Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FEUP

A Eficiência Energética em Elevadores e Escadas Rolantes

José Augusto Moreira Guedes

Versão Final

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira
Co-orientador: Eng.º Marco Paulo de Carvalho Passos Pereira

julho de 2017

Resumo

Este trabalho tem por objetivo estudar e propor medidas que possam levar à redução dos custos de energia elétrica, e consequentemente o aspeto económico e ambiental, em transportes verticais e escadas rolantes, para pessoas e cargas, por forma a baixar significativamente a fatura de energia. Serão estudados todos os orgãos que constituem estes equipamentos e que levam a uma melhoria da eficiência energética no seu conjunto.

Serão estudados os motores que integram estes equipamentos, sistemas de arranque, a relação entre a carga a elevar e a potência dos motores, tipos de frenagem, os consumos em vazio e à plena carga. Serão abordados, numa perspetiva de melhorar os consumos e gerir o tráfego, o cálculo do número de elevadores a instalar num determinado empreendimento que simultaneamente nos irá levar ao tipo de comando mais adequado. Diferenças entre elevadores elétricos e hidráulicos, vantagens e desvantagens.

E finalmente serão estudadas e propostas medidas tecnológicas que nos levem a reduzir os consumos de energia numa atitude que favoreça de forma inequívoca a eficiência energética de forma sustentável.

Palavras-chave: Eficiência Energética; transporte vertical; ímanes permanentes; rotor em cobre; elevadores sem casa de máquinas (machine room less elevators-MRL); classificação energética; Projecto E4; Gerador fotovoltaico.

Abstract

This work aims to study and propose measures that can lead to reduced energy costs and, consequently, economic and environmental aspect, in vertical transport and escalators for passengers and cargo, so as to significantly lower the energy bill. They will study all of the organs that make up these devices and that lead to improved energy efficiency as a whole.

The engines will be studied to integrate these devices, starter systems, the relationship between the load and to increase the engine power, braking types, the consumption of empty and full load. We will address, in a perspective of improving consumption and manage traffic, calculating the number of elevators to be installed in a given enterprise that simultaneously will lead to the most appropriate type of command. Differences between electrical and hydraulic lifts, advantages and disadvantages.

And finally study and propose the introduction of technological measures that lead us to reduce energy consumption in an attitude that favors unequivocally energy efficiency sustainably.

Keywords: Energy Efficiency; vertical transport; permanent magnets; rotor copper; without machine room elevators (MRL); energy rating; E4 Project; PV generator.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado durante o segundo semestre de 2017, e teve a participação do Eng.º Marco Pereira da empresa "Orona Portugal, Lda" no desenvolvimento deste trabalho.

Quero agradecer ao Senhor Vítor Soares da "EP-Elevadores Padrão, Lda" que com muita boa vontade colaborou na feitura desta dissertação.

Ao Eng.º Maurício docente no ISEP e director da revista "ELEVARE" que me orientou e aconselhou na elaboração da dissertação.

Ao Senhor Professor Doutor José Rui Ferreira, orientador deste projeto, pela sua inteira disponibilidade, mesmo em alturas complicadas e pelas valiosas sugestões e correcções ao longo do trabalho.

Por fim agradecer o apoio incondicional ao Senhor Professor Doutor Machado e Moura e à Senhora D.ª Lourdes Rocha que desde o primeiro dia em que entrei nesta Faculdade, e já lá vão alguns anos, sempre estiveram presentes de forma a que eu pudesse chegar ao fim desta longa jornada.

A DEUS que esteve sempre presente nos momentos em que estive mais desgastado e sem alento.

Índice

Lista de figuras

Lista de tabelas

Abreviaturas e Símbolos

f – frequência

p – par de pólos

$\boldsymbol{n_S}$– velocidade de sincronismo

r.p.m. – rotações por minuto

$\mathbf{X}_q$ – reactância síncrona segundo o eixo em quadratura

$\mathbf{X}_d$ – reactância síncrona segundo o eixo direto

f.e.m – força electromotriz

U – tensão aos terminais do induzido

$\mathbf{R}_S$ – resistência do induzido

$\boldsymbol{X_S}$ - reactância síncrona

r – razão de anisotropia

$\mathbf{i}_d$ - corrente no estator

$\mathbf{B}_{indutor}$ - campo magnético indutor

$\mathbf{B}_{induzido}$ - campo magnético induzido

$\mathbf{T}_R$- binário resistente

λ – ângulo de binário

δ – ângulo de carga

$\mathbf{T}_e$ - binário de carga

$\mathbf{P}_f$ - potência eletromagnética

$\mathbf{T}_S$ – binário de arranque

$\mathbf{T}_{ass}$- binário assíncrono

$\mathbf{T}_f$ - binário de frenagem

$\mathbf{T}_{rel}$ - binário relutante

IE1 – eficiência standard

IE2 – eficiência elevada

IE3 – eficiência premium

IE4 – eficiência super premium

IEC – comissão eletrotécnica internacional

$\mathbf{CO_2}$ - dióxido de carbono

EPB – energy performance of buildings

EuP – energy using products

SAFE – agência suiça para a utilização eficiente de energia

VVVF – variação de velocidade por variação de frequência

MRL – elevador sem casa das máquinas

VEV – variador eletrónico de velocidade

WBCSD – world business council for sustainable development

URE – utilização racional de energia

ABNT – associação brasileira de normas técnicas

ANIEER – associação nacional dos industriais de elevadores e escadas rolantes

NBR – norma brasileira

AL – portas automáticas de abertura lateral ou telescópicas

AC – porta automáticas de abertura central

T1 – percurso total

T2 – aceleração e retardamento

T3 – abertura fecho de portas

T4 – tempo gasto na saída e entrada de passageiros

T – tempor total de viagem em segundos

Ct – capacidade de transporte

C – capacidade da cabina

CT – capacidade de tráfego

I – intervalo de tráfego

n – número de levadores do grupo

K – grau de serviço

RESP – rede elétrica de serviço público

QPCM – quadro parcial da casa das máquinas

PV – painéis fotovoltaicos

UPAC – unidade produção autoconsumo

NA – contacto normalmente aberto

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 - A História do elevador

Até que os elevadores decidam parar e sejamos obrigados a subir os 7 pisos até ao nosso apartamento pouco nos preocupamos com eles e no entanto são um dos elementos de modernidade e progresso que estão, dia a dia, ao nosso serviço.

Damos a sua existência por adquirida e vamos tropeçando neles, encontrando-os aqui e ali com diferentes formas, cores, velocidades, uns mais austeros, outros mais barrocos, grandes e pequenos, outros ainda mais funcionais e ornamentais.

A invasão súbita do elevador de tracção eléctrica no século XIX, com a profusão de instalações que se deu no século XX, constituiu um dos factores de mudança mais relevantes para a socialização da humanidade.

O elevador trouxe à arquitectura a capacidade de desenvolvimento vertical das cidades o que seria impensável sem tal invento.

Sem ele, não seria possível conceber os arranha-céus e, bem assim, algumas das maravilhas do nosso tempo seriam impensáveis.

A origem dos elevadores, como outros inventos funda-se nos confins da história e como sempre nem todas as versões coincidem.

Na resenha que se apresenta dá-se nota das etapas mais significativas da história do elevador, desde a Antiguidade passando pelo período greco-romano, era moderna, até se chegar aos nossos dias, numa altura em que o record do edifício Taipei 101 em Taiwan com 508 m de altura está largamente batido pela Burja Tower no Dubai, com os seus 818 m de altura.

1.2 - Da antiguidade aos nossos dias

As origens dos primeiros sistemas de elevação podem ser encontradas na Antiguidade, mais não sendo que máquinas simples, baseadas em alavancas, rodas, cordas e planos inclinados.

A construção, no Egipto, da pirâmide de Cheops (século XXII a.C) em Gizé, com 147 m de altura e blocos de pedra de 90 toneladas, é um exemplo de uma obra cuja realização só foi possível usando meios de elevação de grande engenho. Construída ao longo de 20 anos, calcula-se que tenham participado na construção 100000 pessoas, continuando hoje os visitantes a interrogar-se como foi possível tal construção.

A civilização egípcia está cheia de encantos e mistérios, atribuindo-se-lhe avanços e conhecimentos científicos muito ousados para a época.

Figura 1.1 – Pirâmide egípcia; Fonte: www.anieer.com/conteudos

Com a revolução neolítica, nasce a agricultura, e o homem deixa de ser um mero recolector e passa a produzir, de forma sistemática, mais do que consome, começando a fixar-se e a construir cidades.

Fixando-se nos vales férteis dos grandes rios Nilo e Eufrates, o desenvolvimento da agricultura só se torna possível com a utilização de engenhosos sistemas de captação de água, entre eles o "shadoof" ou picota (1550 a.C) que se baseia nas leis da alavanca , utilizando já uma pedra como contrapeso.

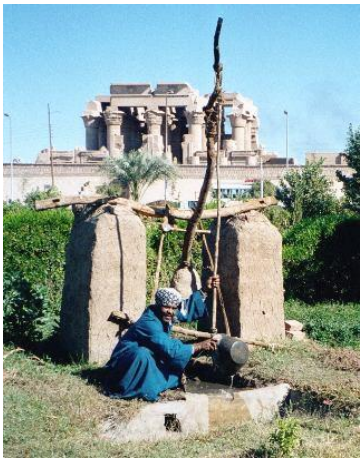


Figura 1.2 – Elevador rudimentar

Fonte: www.anieer.com/conteudos

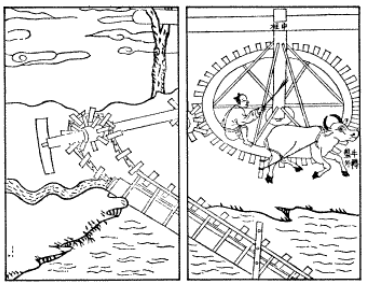


Figura 1.3 – Aparelhos de elevação
Fonte: www.anieer.com/conteudos

1.3 - Período greco-romano (séc. X a.C – V d. C)

O período greco-romano é indubitavelmente um período de grande desenvolvimento de sistemas mecânicos e, consequentemente, da tecnologia do elevador. Do período grego destacam-se os trabalhos de **Ctésíbio** (285-212 a.C), considerado o pai da hidráulica; **Arquimedes** (287-212 a.C), o grande matemático e engenheiro inventor dos sistemas diferenciais e do parafuso sem-fim, utilizado para a captação de água; e **Heron de Alexandria** (10-70 d.C), o inventor da eolípila (máquina a vapor) e da roda composta.

Por outro lado, vários documentos atestam que o elevador já era conhecido na Roma antiga, podendo encontrar-se descrições detalhadas do elevador do Palácio de Nero (64 d.C), bem como dos elevadores da era de Tito, instalados no Coliseu de Roma, utilizados para elevar os gladiadores.

À queda do império romano segue-se um período de apagamento no desenvolvimento do elevador.

1.4 - A idade média (séc. V – XVII d.C)

Este período pode ser caracterizado pelo aperfeiçoamento dos sistemas de elevação em boa medida como resultado do desenvolvimento da navegação do comércio e da indústria, sobretudo nos séc. XI e XII.

Não podemos deixar de referir o génio do Renascimento – Leonardo Da Vinci (1452-1519), o qual para lá de mestre nas artes, foi um grande engenheiro, espalhando o seu génio por obras tão variadas como a construção de máquinas de guerra, a hidráulica, máquinas voadoras de que veio a derivar o helicóptero e, também plataformas verticais cuja conceção está muito próxima das soluções atuais.

1.5 - A idade moderna

A História segue o seu curso, assistindo-se ao longo do século XVIII à instalação de diferentes equipamentos em palácios e monumentos.

É no século XVIII com o invento da máquina a vapor por James Watt (1736-1819), e com a expansão da Revolução Industrial que o elevador entra própriamente na era moderna.

O uso do vapor como forma de energia tem a sua aplicação nos elevadores das minas e na indústria têxtil na Grã-Bretanha.

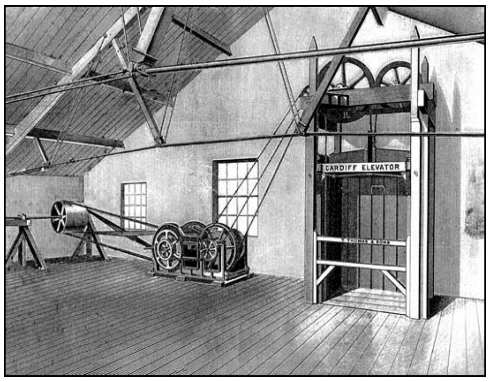


Figura 1.4 – O elevador na sua forma mais moderna
Fonte: www.anieer.com/conteudos

Até esta data todo o desenvolvimento deu-se no sentido da facilitação da elevação de cargas.

No entanto uma pergunta pairava na mente de todos os que acompanhavam este processo: *como evitar que a ruptura da corda seja fatal para os utilizadores ?*

É na procura de resposta para esta questão que Elisha Graves Otis (1811- 1861) se lançou, vindo em 1853, a construir um sistema de segurança capaz de prevenir a queda do elevador.

Em 1854, por ocasião da exposição universal de Nova Iorque, Elisha G. Otis faz, no Pavilhão de Cristal, a sua famosa demonstração.

Figura 1.5 – Ruptura do cabo de suspensão
Fonte: www.anieer.com/conteudos

Nasce aqui o conceito de elevador como se conhece hoje, utilizável por pessoas e mercadorias.

Inicia-se uma fase de desenvolvimento acelerado de soluções, quer nos Estados Unidos, quer na Europa, onde, em 1874, é criada a primeira fábrica de elevadores.

Assim, em 1857, é instalado em Nova Iorque nos armazéns E.V. Haughwout & Co o primeiro elevador para passageiros.

Em 1867, na exposição universal de Paris são apresentados por Leon Edoux, elevadores hidráulicos movidos a água, com uma altura de 21m.

Da primeira etapa totalmente mecânica, passou-se à utilização do vapor, seguida da hidráulica, até que, na segunda fase do século XIX, surge a electricidade.

Com a electricidade, assiste-se a uma nova Revolução Industrial, desenvolvendo-se o motor industrial.

Em 1880, os irmãos Siemens apresentam, na feira industrial de Manheim - Alemanha , o primeiro elevador movido a partir de um motor elétrico.

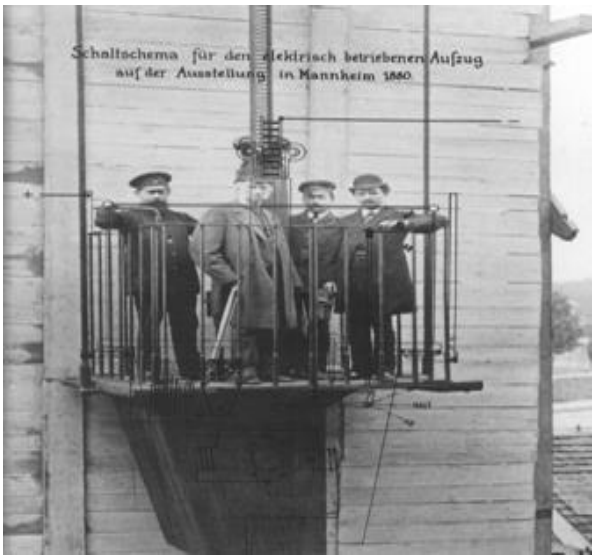


Figura 1.6 – Elevador de estaleiro de obras
Fonte: www.anieer.com/conteudos

Rapidamente o elevador de tracção eléctrica se impõe, quer pelo seu custo,quer pela facilidade de instalação, tendo como principal inconveniente a pouca precisão de paragem.

Este inconveniente viria a ser superado mais tarde com os reguladores de velocidade de Ward Leonard.

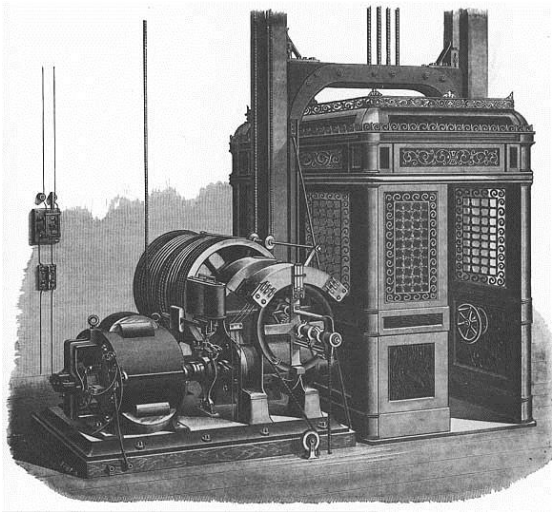


Figura 1.7 –Elevador com casa da máquina em baixo
Fonte: www.anieer.com/conteudos

1.6 - Século XX

No século XX o elevador instala-se definitivamente nas cidades.

Por uma questão de análise pode-se considerar neste século três fases distintas no desenvolvimento do elevador:

1.6.1 - 1ª fase até meados do século

As ordens de comando ao elevador que até esta altura dadas através de um cabo ou corda, passam a a ser transmitidas através de impulsos eléctricos.

É o tempo do ascensorista como gestor do sistema.

No segundo quartel deste século desenvolvem-se no EUA sistemas de gestão do sinal, os quais tornam possível um forte incremento na performance dos elevadores chegando-se a atingir velocidades da ordem dos 7,0 m/s consideradas ainda hoje muito elevadas.

Casos típicos desta aplicação são os elevadores do Empire State Building, Chrisler Buildings e parte dos elevadores do Rockefeller Center.

Estes equipamentos que num primeiro momento dependiam do ascensorista foram actualizados por volta dos anos 40, com a inclusão do controlo automático de grupo.

Por seu lado em 1945, inicia-se o fabrico de elevadores com sistema Ward Leonard de corrente contínua e regulação electrónica (é o tempo das válvulas).

1.6.2 - 2ª fase anos 50/70

Inicia-se a aplicação dos sistemas electrónicos aos elevadores.

É o advento da era da electrónica, iniciando-se o desenvolvimento de manobras programadas.

Nesta fase, a generalidade dos sistemas de tracção utilizava o motor de corrente alterna de uma ou duas velocidades, continuando a aplicar-se nas situações de maior exigência os sistemas de corrente contínua.

Neste período, retorna o ascensor hidráulico agora utilizando o óleo mineral como fluido propulsor.

Em princípios da década de 60, desenvolvem-se e começam a ser aplicadas soluções de tração com recurso a transistores de germânio.

1.6.3 - 3ª fase anos 70 até final do século XX

Neste período, primeiro o circuito integrado, nos anos 70, e, microprocessador nos anos 80 marcam em definitivo o seu lugar na História.

Nesta fase observam-se também grandes alterações nos sistemas de tracção passando a utilizar-se cada vez mais conversores de frequência a par de sistemas de tração directa (gearless).

1.7 - Perspetivas futuras

Chegados ao século XXI, com todos os avanços científicos e tecnológicos, pergunta-se, naturalmente, qual o futuro do elevador?

Após uma história de milénios, a indústria está confrontada com um conjunto de questões de capital importância:

- A melhoria da perfomance dos equipamentos

. conforto, precisão de paragem, ruído e vibração;

- A resposta às questões da acessibilidade

. equipamentos adapatados dimensional e funcionalmente ao uso por pessoas com mobilidade condicionada, incluindo os idosos;

- A eficiência energética

. adaptar os equipamentos às necessidades dos utilizadores, melhorando a eficiência dos sistemas de tracção e o consumo dos equipamentos em standby;

- A melhoria de resposta às necessidades de tráfego dos edifícios

. desenvolver algoritmos mais potentes e capazes de modelar melhor a procura;

1.8 - Para além do planeta terra

Deixa-se à imaginação de cada um o cenário aprouver sem excluir a hipótese do elevador espacial, cuja discussão se iniciou em 1895, mas que hoje é motivo de muitas e interessantes discussões nos meios científicos.

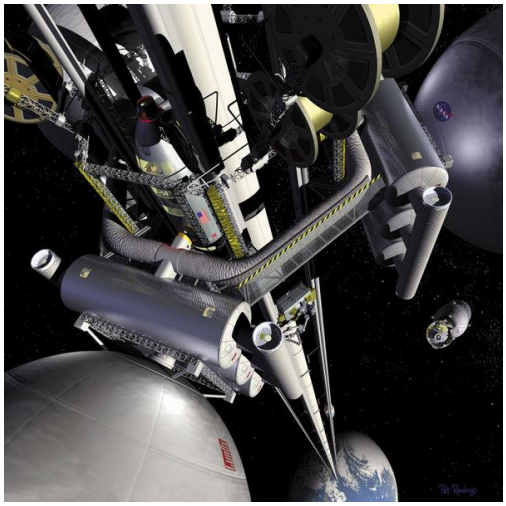


Figura 1.8 - Modelo de elevador espacial (representação feita pela NASA)

Fonte: www.anieer.com/conteudos

1.9 – Estrutura do relatório

Este documento está estruturado em 8 capítulos, apresentando-se em seguida uma breve descrição de cada um a saber:

Capítulo 1 – Breve história do elevador desde o seu surgimento até aos nossos dias que com ele foi possível transpor barreiras, melhorando de modo significativo a circulação de pessoas em espaços em altura.

Capítulo 2 – Características dos elevadores tendo em atenção os tipos de motores utilizados para o seu acionamento tendo em consideração máquinas com e sem redutor.

Capítulo 3 - A eficiência energética, onde salientamos de forma sintética o Protocolo de Kyoto, o estado em "*standby*" a iluminação "*LED*", os variadores de velocidade por variação de frequência e a utilização racional de energia, entre outros.

Capítulo 4 – Abodaremos a eficiência energética em elevadores e escadas rolantes na União Europeia – Projeto E4, o mercado europeu e os consumos de energia.

Capítulo 5 – O efeito regenerativo e o modo como funciona a regeneração em grupo.

Capítulo 6 – Número de elevadores a instalar num edifício. Características dos edifícios. Tipos de comando. Cálculo de tráfego.

Capítulo 7 – Elevadores hidráulicos e escadas rolantes. Vantagens e desvantagens dos elevadores hidraúlicos. O surgimento das escadas rolantes. Escadas e tapetes rolantes. Princípio de funcionamento. Dimensionamento do motor. Tipos de comandos existentes.

Capítulo 8 – Melhoria da eficiência energética e sua sustentabilidade. O autoconsumo na perpectiva ao recurso das energias renováveis. Painéis solares fotovoltaicos. Relé temporizado.

Capítulo 2

Características dos elevadores

Os elevadores são equipamentos de transporte vertical utilizados para pessoas e cargas. Para que possam operar nas condições normais de funcionamento precisam de um redutor e de um motor elétrico trifásico. O redutor serve para desmultiplicar a rotação do motor elétrico de modo a permitir uma velocidade adequada para o fim a que se destina. O conjunto redutor/motor elétrico/freio elétrico, é designado por máquina de tração.

As suas características são função da velocidade da cabina, da carga a transportar e o curso do elevador, ou seja, o percurso que o mesmo vai percorrer desde o primeiro até ao último patamar.

Tendo em conta os custos de produção, a competividade das marcas face aos mercados, nos últimos anos a tecnologia teve de evoluir de tal forma que hoje temos uma máquina de tração do tipo monobloco, ou seja, associa num único conjunto o motor elétrico, o redutor e o freio.

2.1- O redutor de velocidade

São máquinas que se utilizam para obtenção de grandes reduções de transmissões, sem que haja necessidade de recorrer a engrenagens de grandes diâmetros ou de rodas dentadas de pequeno diâmetro assim como multiplicar o binário permitindo maiores cargas radiais e axiais, e flexibilizar a montagem.

Os redutores podem ser constituídos de engrenagens paralelas, cónicas, e com coroa e parafuso sem-fim. Nos elevadores são utilizados redutores com roda de coroa e parafuso sem-fim a ela associada como ilustra a figura 2.1.

Figura 2.1 - Roda de coroa e parafuso sem-fim

Fonte: https//images.search.yahoo.com

Na actualidade a máquina de tração dos elevadores e escadas rolantes assume um aspecto bem mais simples do que as anteriores.

Hoje falar na máquina de tração dos elevadores é dizermos que num só conjunto temos o motor eléctrico, o redutor, a roda de gornes, o freio e as respectivas maxilas.

Figura 2.2 – Máquina de tração sem redutor no interior da caixa

Esta solução sendo a mais económica e de fácil montagem, é aquela que em termos de estética mais agrada aos arquitetos que sempre se opuseram à casa das máquinas em cima.

Com isto a casa das máquinas, conforme mostra a **figura 2.2** passou a cair em desuzo, optando-se por uma solução que para além de melhorar o aspeto arquitetónico muito contribuiu para a eficiência energética.

Figura 2.3 – Máquina de tração com redutor e casa das máquinas

Tradicionalmente como mostra a **figura 2.3**, existe uma casa das máquinas, uma área técnica para alojar os orgãos de tração, o quadro parcial da casa das máquinas, o quadro de comandos e o regulador de velocidade.

Com o aparecimento das máquinas sem redutor esta passa a ser instalada numa bancada em ferro colocada na parte superior da caixa do elevador. Desta forma foram reduzidos, o tempo gasto na instalação e o custo dos materias que se virão a refletir nos custos com a construção civil.

2.2 - Motores elétricos

Os motores utilizados para o acionamento dos elevadores e escadas rolantes, são de indução monofásicos ou trifásicos de rótor em curto-circuito, gaiola de esquilo, e o estátor de ímanes permanentes.

Citando a tese de mestrado integrado na FEUP – Comparação Experimental das Características de Funcionamento de um Motor de Ímanes Permanentes com Condições de Alimentação Diversas de abril de 2014 "Tentar-se-á fazer um estudo aprofundado do motor síncrono de ímanes permanentes onde se evidenciará os seus aspetos construtivos, o seu princípio de funcionamento e as suas principais características. Ir-se-á ter em conta o problema do arranque desta máquina que será objeto de estudo. Por fim, é feita uma análise comparativa deste motor com outras alternativas existentes no mercado, tentando perceber qual a solução

tecnológica que se enquadra melhor para se impor no mercado a médio/longo prazo.

As máquinas elétricas rotativas com alimentação trifásica, assim como a maioria das máquinas elétricas rotativas, podem funcionar como motor ou como gerador. Como motor convertem energia elétrica, a partir de uma fonte, em energia mecânica, que aciona uma carga acoplada ao veio. Como gerador processa-se o contrário, ou seja, convertem energia mecânica em energia elétrica.

Estas podem ser síncronas ou assíncronas. Nos motores síncronos, a velocidade angular do veio é constante e independente da carga a ele acoplada, isto até um determinado valor crítico de binário de carga. Neste caso, a velocidade só depende da frequência *f* de alimentação e do número de pares de pólos *p*, como se pode perceber pela análise da expressão **2.1**. Nos motores assíncronos há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga ao veio, portanto, a velocidade para além de depender da frequência e do número de pares de pólos, também depende do binário de carga.

Nas soluções trifásicas mais comuns, estas máquinas possuem no estator enrolamentos trifásicos destinados a serem percorridos por um sistema trifásico de correntes, que criarão uma força magnetomotriz (f.m.m.) e um campo magnético girante - o campo magnético girante do estator. Chama-se velocidade de sincronismo, n_S, à velocidade de rotação do campo magnético girante do estator, cujo valor é determinado pela expressão (2.1).

$$\eta_s = \frac{f \times 60}{p} \ (r.p.m.) \tag{2.1}$$

Com efeito, nas máquinas síncronas a velocidade de rotação do veio é igual à velocidade de sincronismo. Assim, as máquinas síncronas operam a velocidade constante em absoluto sincronismo com a frequência da tensão de alimentação. Estas encontram-se divididas em quatro categorias:

- Máquinas de excitação eletromagnética
- Máquinas de ímanes permanentes
- Máquinas de relutância
- Máquinas de histerese

As máquinas de excitação eletromagnética, ou seja, as máquinas síncronas convencionais, são atualmente uma tecnologia que se encontra num estado de maturação muito elevado. São máquinas amplamente utilizadas em sistemas de velocidade variável de grande potência, assim como na geração térmica e hídrica. Para sistemas de pequena potência, utilizam-se as suas variantes que resultam do uso de ímanes permanentes no circuito de excitação - as máquinas síncronas de ímanes permanentes, do aproveitamento do efeito de relutância magnética - máquinas síncronas de relutância - ou do aproveitamento do efeito de histerese magnética de certos materiais - máquinas síncronas de histerese.

Para aplicações de baixa/média potência torna-se vantajosa a substituição do enrolamento indutor, presente no rotor dos motores síncronos, por ímanes permanentes. Perde-se a capacidade de regulação do fator de potência, mas ganha-se a vantagem de não ser necessário o sistema de anéis/escovas, nem o circuito elétrico de excitação, bem como todo o sistema de controlo desta corrente. O mesmo se passa com as máquinas de relutância e com as de histerese.

Na **figura 2.4**, encontra-se representado um rotor de uma máquina síncrona convencional equipado com os anéis que constituem o sistema anéis/escovas. Como se pode reparar, este sistema é bastante complexo, encarecendo bastante a máquina, pelo que para aplicações de potências mais reduzidas pode tornar-se numa solução economicamente inviável. Por outro lado, as escovas são suscetíveis de um enorme desgaste, aumentando muito o nível de manutenção da máquina.

Perante isto, a utilização de ímanes permanentes neste tipo de máquinas torna-se economicamente viável para aplicações de potências mais reduzidas, conseguindo-se obter motores muito mais robustos, fiáveis, energeticamente mais eficientes e com custos de manutenção muito mais baixos.

Figura 2.4 - Rotor de uma máquina síncrona convencional equipado com anéis

As máquinas de ímanes permanentes atuais são bastante competitivas, tanto com as máquinas síncronas convencionais como com as de indução. Estruturalmente, estas devem ser o mais simples possível para que da sua construção resulte um preço capaz de competir com outras máquinas de igual potência nominal.

As máquinas síncronas de ímanes permanentes podem ser classificadas como máquinas síncronas especiais devido à inexistência de corrente de excitação. O campo indutor é criado pelos ímanes inseridos no rotor, o que é equivalente a ter uma máquina síncrona com o rotor excitado por uma corrente constante. Quanto mais potentes forem os ímanes, maior será o valor do binário máximo que a máquina é capaz de produzir.

O desenvolvimento das máquinas de ímanes permanentes tem resultado da melhoria das

características dos materiais magnéticos, nomeadamente nos últimos trinta anos, desenvolvimento esse que se traduziu pelo aumento das potências disponíveis, do factor de potência e do respetivo rendimento.

A utilização destas máquinas em aplicações exigentes e com características melhoradas é também devida ao uso de sistemas de controlo baseados em electrónica de potência a custos acessíveis.

Estas máquinas síncronas, como visto anteriormente, podem funcionar como motor ou como gerador. Apesar do crescente interesse da sua aplicação como gerador, como no caso da produção eólica, é como motor que tem tido maior aplicação. O número de aplicações tem crescido muito rapidamente, sendo hoje uma máquina que se está a impor nos sistemas de automatismos industriais e robótica.

Como motor, esta máquina tem um concorrente de peso - o motor de indução. Atualmente, o motor de indução representa entre 80% a 85% dos motores elétricos em serviço no mundo, pelo que os fabricantes de motores síncronos de ímanes permanentes têm de conceber máquinas que superem a performance daquele a um preço igual ou inferior.

2.3 - Aspetos construtivos

Do ponto de vista eletromagnético, uma máquina elétrica rotativa é constituída, fundamentalmente, por duas partes distintas, uma designa-se de indutor e outra de induzido. No indutor é gerado o campo magnético de excitação, e no induzido, também denominado por armadura, processam-se os fenómenos eletromagnéticos. Uma das partes é fixa e a outra é móvel. À parte fixa dá-se o nome de estator e à parte móvel, de rotor. O espaço existente entre estas duas partes designa-se de entreferro.

No caso do motor síncrono de ímanes permanentes, o indutor, ou seja, o responsável pelo fluxo de excitação da máquina, situa-se no rotor. Isto deve-se à presença dos ímanes permanentes neste. Por sua vez, o induzido situa-se no estator, e é constituído pelo enrolamento trifásico.

A máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta uma constituição análoga à das máquinas síncronas convencionais constituídas por um estator semelhante ao utilizado nas máquinas clássicas (síncronas ou assíncronas), em que os enrolamentos estão dispostos em ranhuras. Na maioria das configurações rotóricas, os ímanes permanentes são colocados no interior da sua estrutura, podendo também ser aplicados à sua superfície.

Como visto no capítulo anterior, estas máquinas podem tomar diferentes designações de acordo com a orientação do fluxo no entreferro e no núcleo do estator. Atualmente, os motores de fluxo radial são os mais comuns. Ainda assim, o número de aplicações com motores de fluxo axial tem vindo a crescer nos últimos anos devido à sua elevada densidade de potência e capacidade de aceleração. Na **figura 2**.5, é possível visualizar-se a estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes de fluxo radial.

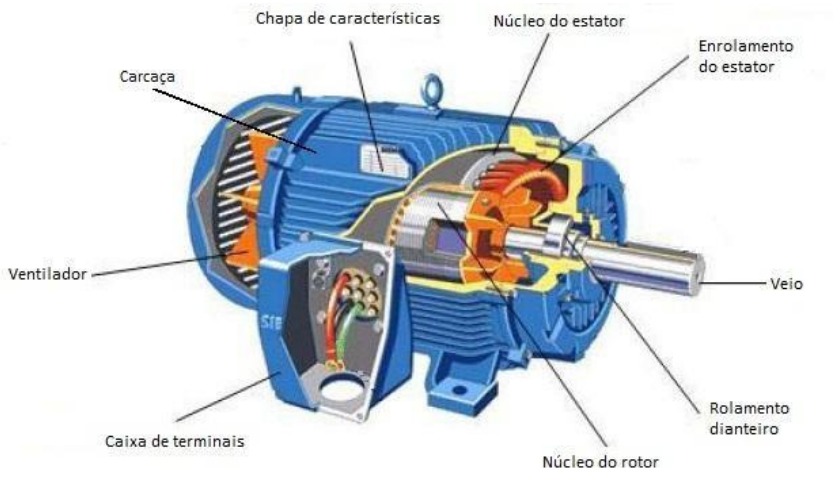


Figura 2.5 - Estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes de fluxo radial

Segundo o autor, o motor síncrono de ímanes permanentes utilizado durante a investigação experimental é um motor de fluxo radial, pelo que o estudo irá centrar-se neste tipo de motores. Sempre que nos referirmos ao motor síncrono de ímanes permanentes, supõe-se que se trata de um motor de fluxo radial.

Os principais componentes constituintes do motor síncrono de ímanes permanentes encontram-se a seguir descritos.

2.3.1 - Carcaça

A carcaça em motores de pequena/média dimensão é fabricada em ferro fundido ou alumínio injetado. Em motores de grande dimensão pode ser realizada em estrutura soldada. Esta destina-se a alojar o estator e o rotor, envolvendo habitualmente o estator com tampas nas extremidades que podem funcionar como elementos de apoio do próprio veio. Tem também a função de proteger os componentes do motor dos efeitos prejudiciais do ambiente em que o mesmo opera, sendo que o tipo de carcaça definirá os índices de proteção e de montagem.

2.3.2 - Estator

O estator que compõe o motor síncrono de ímanes permanentes é, geralmente, semelhante ao das máquinas convencionais (síncronas e assíncronas). O seu núcleo é constituído pelo empilhamento de finas chapas de material ferromagnético em forma de anel isoladas entre si (**figura 2.6**), conduzindo a um efetivo aumento da resistência transversal do circuito magnético, contribuindo assim para uma redução substancial das correntes de Faucault e das perdas magnéticas por si originadas. As chapas possuem ranhuras nas quais são colocados os condutores que constituem o enrolamento, normalmente trifásico. O enrolamento pode ser realizado em fio ou barra de cobre, dependendo da potência da máquina. O circuito elétrico é isolado do circuito magnético por meio de um material isolante, como se pode ver na **figura 2.7** (a).

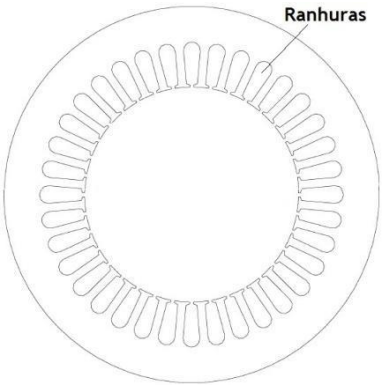


Figura 2.6 - Forma anelar das chapas estatóricas

As chapas possuem uma elevada permeabilidade magnética, criando um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, diminuindo assim o fluxo de dispersão e concentrando o campo no entreferro. Estas chapas são, em geral, tratadas termicamente a fim de reduzir o valor das perdas específicas por correntes induzidas.

A presença das ranhuras além de diminuir o entreferro efetivo, quando comparado com o entreferro do estator não ranhurado em que os enrolamentos são colocados à superfície, também é um meio bastante eficiente de transmissão de calor para o exterior. No entanto, a sua presença no circuito magnético do estator provoca variações periódicas na forma de onda da indução magnética no entreferro, o que resulta em harmónicos na forma de onda da força eletromotriz induzida. Este efeito pode ser minimizado inclinando os ímanes no rotor de um passo de ranhura do estator. A inclinação dos ímanes, embora reduza ligeiramente o valor eficaz da tensão induzida, é eficaz na redução do seu conteúdo harmónico e dos binários de relutância parasitas.

Na **figura 2.7** pode ser visualizado o estator de um motor síncrono de ímanes permanentes, primeiramente na fase de montagem dos enrolamentos estatóricos (a) e, de seguida, após a conclusão dessa mesma montagem (b).

Figura 2.7 - Estator de um motor síncrono de ímanes permanentes: (a) execução dos enrolamentos; (b) núcleo com enrolamento completo

Normalmente, o estator de um motor síncrono de ímanes permanentes possui dois pares de pólos, obtendo-se assim, à frequência da rede elétrica nacional de 50 Hz, uma velocidade de sincronismo de 1500 rotações por minuto, pela aplicação da equação 3.1. No entanto, existem motores com um número de pares de pólos diferente. Normalmente, em aplicações que exijam baixas velocidades, o número de pares de pólos é superior.

2.3.3 - Entreferro

O entreferro é a região interna da máquina que separa o núcleo estatórico do núcleo rotórico. Este assume-se como um parâmetro essencial em qualquer máquina elétrica rotativa.

Geralmente, à medida que a espessura do entreferro aumenta, as tolerâncias ao nível mecânico das superfícies rotórica e estatórica são menos exigentes, o que se traduz numa redução do custo do motor. No entanto, este aumento do entreferro, vai exigir a aplicação de ímanes permanentes com campos coercivos mais elevados, logo poder-se-á tornar numa solução mais cara. Há, então, a necessidade de ponderar diversos parâmetros para responder às elevadas exigências atuais do mercado, ao menor custo possível.

2.3.4 - Rotor

O desenvolvimento dos motores de ímanes permanentes passa, essencialmente, pela otimização das configurações rotóricas, tendo como objetivo diminuir o peso e o custo do rotor, minimizar o fluxo de fugas entre os ímanes e maximizar a indução magnética no entreferro.

O rotor de um motor síncrono de ímanes permanentes pode assumir diversas configurações consoante o tipo e posicionamento/localização dos ímanes. Normalmente, o seu núcleo é constituído de chapas ferromagnéticas compactadas e isoladas entre si, no qual se encontram ranhuras onde são colocados os ímanes permanentes, e as barras de alumínio que formam a

gaiola rotórica.

De referir que a maior parte dos motores síncronos de ímanes permanentes apresenta uma estrutura rotórica em que os ímanes são colocados no seu interior. Esta topologia dá origem a um circuito magnético anisotrópico, como acontece nas máquinas síncronas de pólos salientes. Contudo, no caso do motor síncrono de ímanes permanentes, a anisotropia é inversa, $X_q > X_d$, devido ao facto do percurso do fluxo segundo o eixo em quadratura (q) se desenvolver num percurso caracterizado por uma relutância menor que a do percurso segundo o eixo direto (d).

Existem, ainda, configurações em que os ímanes são colocados na superfície rotórica do motor. Nestes casos, do ponto de vista magnético, nem sempre existe anisotropia.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de se encontrar uma configuração que permita obter uma maior eficiência energética ao menor custo possível. No seguimento, são apresentadas algumas das configurações rotóricas que são adotadas frequentemente pelos fabricantes.

2.3.4.1 - Topologia periférica

Na topologia periférica, os ímanes permanentes são colocados na periferia do rotor. De seguida são apresentados alguns exemplos de configurações que utilizam esta topologia.

Na configuração rotórica apresentada na **figura 2.8**, pode verificar-se que os ímanes são colocados na periferia do núcleo do rotor. Esta configuração permite obter uma maior densidade de fluxo no entreferro, contudo, possui uma menor integridade estrutural e menor robustez.

O rotor é caracterizado por um núcleo ferromagnético laminado que apresenta simetria circunferencial. Devido a esta simetria, este rotor possui um circuito magnético isotrópico (X_d =X_q), como acontece com as máquinas síncronas convencionais de rotor cilíndrico.

Assim, em regime síncrono, o binário eletromagnético desenvolvido pelo motor deve-se, em exclusivo, à interação entre o campo girante produzido pelas correntes induzidas nos enrolamentos do estator e o campo magnético produzido pelos ímanes permanentes.

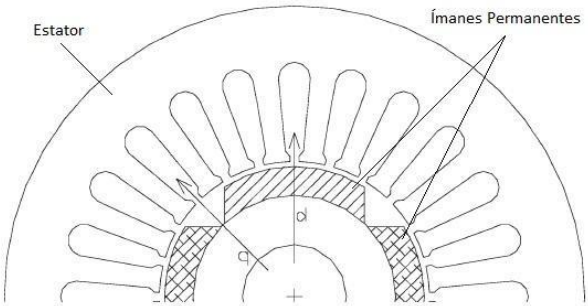


Figura 2.8 - Configuração rotórica com ímanes dispostos perifericamente

Na **figura 2.8**, encontra-se representada uma outra configuração em que os ímanes permanentes são colocados na superfície do rotor. Contrariamente ao que acontece na configuração rotórica anteriormente analisada, nesta configuração existem saliências entre os ímanes.

Estas saliências originam uma assimetria circunferencial do campo magnético no entreferro, tornando o circuito anisotrópico do ponto de vista magnético. Assim, estas saliências levam ao aparecimento de uma outra componente de binário como acontece nos motores síncronos de relutância - o binário de relutância.

A presença destas saliências, ou pólos salientes, origina diferentes valores de relutância magnética ao longo do entreferro. Logo, a reação do induzido é caracterizada por diferentes valores de reactância síncrona, segundo o eixo direto (X_d) e segundo o eixo em quadratura (X_q). O quociente entre a reatância X_q e a reatância, normalmente designado por razão de anisotropia (r), pode ser expressa por (2.2).

$$r = \frac{X_q}{X_d} \tag{2.2}$$

A razão de anisotropia é uma das características mais importantes para este tipo de motores síncronos, e pode ser particularmente importante em aplicações que necessitem de velocidades de operação superiores à velocidade nominal da máquina.

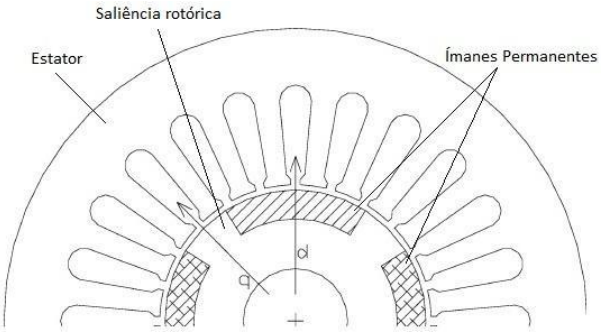


Figura 2.9 - Configuração rotórica com ímanes dispostos perifericamente entre saliências

Esta configuração possui ímanes permanentes em forma de arco, sendo que estes apresentam uma complexidade superior em termos de fabrico, tornando-os mais caros e elevando, assim, o custo final destas estruturas rotóricas.

2.3.4.2 - Topologia interior

Os avanços tecnológicos resultantes do estudo dos motores síncronos de ímanes permanentes de topologia interior têm recebido uma enorme atenção na indústria, devido à sua eficiência superior, comparativamente com outras topologias, e à elevada densidade de potência, tornando estes motores numa excelente opção em diversas aplicações, principalmente naquelas em que velocidade de operação variável é necessária.

Na topologia interior, os ímanes permanentes são colocados no interior do rotor. As configurações com esta topologia, a par da configuração vista anteriormente, apresentam saliências rotóricas, originando um circuito magnético anisotrópico.

Na configuração da **figura 2.9**, é possível verificar que os ímanes permanentes se encontram no interior do rotor. Esta configuração dá origem a um circuito magnético anisotrópico. Portanto, este circuito é caracterizado por apresentar diferentes valores de relutância magnética segundo os eixos longitudinal (d) e transversal (q).

É caracterizada por ser uma configuração de baixo custo devido à possibilidade de se poder aplicar blocos de ímanes permanentes de formato retangular que, naturalmente, são mais baratos que aqueles em forma de arco, muito utilizados nas configurações de topologia periférica, como se viu anteriormente. Outra razão para o menor custo apresentado por esta configuração prende-se com a utilização de uma única camada de material magnético permanente.

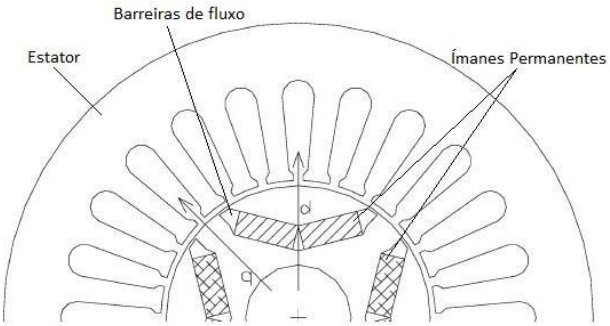


Figura 2.10 - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - camada simples

O seu processo de montagem é relativamente simples, quando comparado com outras configurações.

Na **figura 2.10** encontra-se representada uma outra configuração de topologia interior bastante utilizada. Esta distingue-se da configuração apresentada na **figura 2.11** pelo facto de apresentar uma disposição dos ímanes permanentes e das barreiras de fluxo em múltiplas camadas.

Esta configuração apresenta uma anisotropia superior quando comparada com a configuração de camada simples vista anteriormente, apresentando assim uma razão de anisotropia superior, logo um binário relutante também superior.

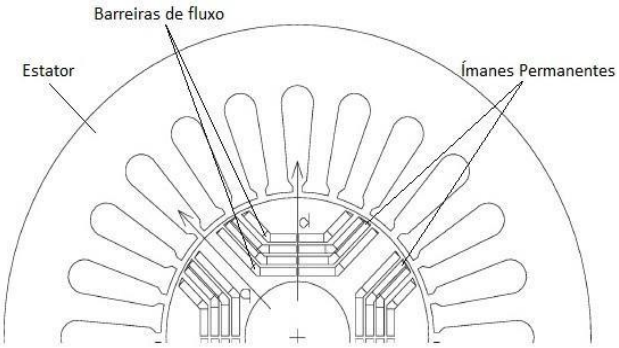


Figura 2.11 - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente - múltiplas camadas

Em termos de processo de montagem, esta configuração torna-se bastante complexa, se construída a partir de blocos de ímanes permanentes. Uma alternativa é a montagem por compressão ou injeção de moldes de material magnético permanente nas ranhuras presentes no rotor para o efeito.

Uma das configurações rotóricas mais utilizadas é apresentada na **figura 2.12**. A par das configurações vistas anteriormente, os ímanes permanentes são colocados no interior da

estrutura rotórica, apresentando uma disposição em camada única. É, também, caracterizada por apresentar um circuito magnético anisotrópico.

A grande particularidade presente nesta configuração traduz-se na presença de uma gaiola rotórica, normalmente constituída por barras condutoras de alumínio. A gaiola confere à máquina características de arranque assíncrono, quando funciona como motor, de amortecimento de oscilações em torno da velocidade síncrona, e protege os ímanes contra o campo desmagnetizante de reação da armadura, em situações de funcionamento assíncrono.

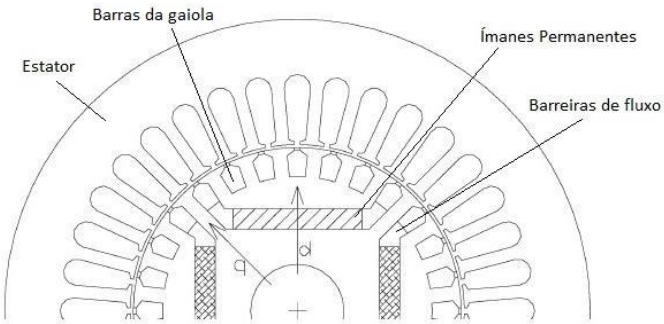


Figura 2.12 - Configuração rotórica com ímanes dispostos interiormente camada simples com gaiola

Nas configurações de topologia interior é comum a aplicação de barreiras de fluxo devido à necessidade de isolamento magnético nas proximidades da superfície rotórica para minimizar a dispersão do fluxo entre pólos adjacentes e maximizar o fluxo que atravessa o entreferro.

Os ímanes permanentes, quando colocados interiormente na estrutura do rotor, encontram-se muito bem protegidos contra forças centrífugas, tornando esta configuração ótima para motores que necessitem de operar a velocidades angulares muito elevadas.

Nas aplicações que necessitam de velocidade variável, o controlo de velocidade é feito na zona de binário máximo disponível, com o aumento da tensão aplicada proporcionalmente à velocidade de rotação. Para o funcionamento a uma velocidade superior àquela estipulada para o motor, há a necessidade deste passar a funcionar na zona de enfraquecimento do campo. Neste caso, como o fluxo magnético produzido pelos ímanes permanentes é constante, a redução do fluxo no entreferro é obtida atuando na componente longitudinal da corrente no estator, $i_{d.}$

No caso dos motores de topologia periférica em que não existe anisotropia magnética, ou em que esta é muito baixa, este tipo de controlo é de difícil implementação, visto que quanto maior for a velocidade para lá do seu valor estipulado, maior terá de ser corrente i_d no estator de forma a criar-se uma oposição ao fluxo magnético constante criado pelos ímanes, enfraquecendo-se assim o campo no entreferro. Como resultado, a corrente total estatórica aumenta de forma não proporcional ao aumento da potência de saída, atingindo-se

rapidamente o valor de corrente máxima admissível, que determinará a velocidade máxima de operação.

No caso dos motores de topologia interior onde existe anisotropia magnética, o binário desenvolvido apresenta uma componente de binário extra - o binário de relutância. Daqui resulta uma vantagem importante para a implementação deste tipo de controlo, visto que a componente longitudinal da corrente no estator necessária para se opor ao fluxo magnético a altas velocidades será menor. Outra vantagem da utilização de motores que incorporem configurações rotóricas de pólos salientes tem a ver com o facto de não ser necessária a utilização de sensores para determinarem a velocidade ou a posição do rotor.

Visto que os motores síncronos de ímanes permanentes são muito utilizados em aplicações de baixa/média potência de velocidade variável, diversos estudos científicos têm surgido no sentido de se melhorar a sua eficiência energética, otimizando os seus componentes de forma a diminuir o nível de perdas.

O principal ponto de focagem tem sido a otimização rotórica, como acontece no estudo realizado que sugere a utilização de um método iterativo automático de otimização, para se conseguir determinar pontos de melhoria no formato dos ímanes e do núcleo rotórico, com o objetivo de reduzir as perdas magnéticas a elevadas velocidades sob controlo de enfraquecimento de campo.

A estrutura rotórica referente a este trabalho de investigação pode ser visualizada na **figura 2.13** (a). Contudo, este estudo foca-se, apenas, na redução de perdas magnéticas a elevadas velocidades de funcionamento, surgindo posteriormente novos estudos que contemplam também a redução de perdas para baixas velocidades, como acontece no estudo desenvolvido.

No seguimento do trabalho desenvolvido, tendo em vista a utilização de motores síncronos de ímanes permanentes de topologia interior numa gama de velocidades muito alargada, surge um estudo que explica como melhorar a configuração rotórica proposta no primeiro trabalho, para se conseguir reduzir ainda mais o nível de perdas magnéticas mantendo-se o binário máximo, obtendo-se a estrutura rotórica demonstrada na **figura 2.13** (b). Após a investigação

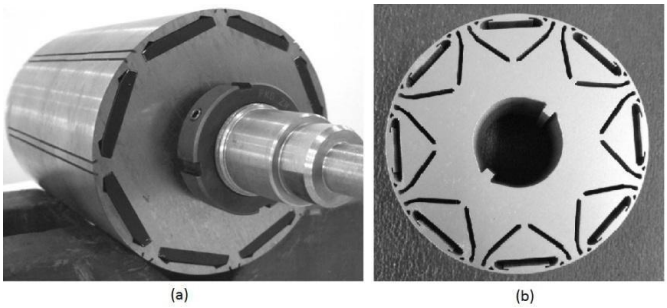


Figura 2.13 - Evolução da estrutura rotórica

realizada neste estudo, os autores concluíram que as perdas magnéticas sofreram uma redução superior a 20% com um decréscimo de apenas 4% no valor do binário máximo, comparativamente

com o estudo realizado.

Em jeito de conclusão, a configuração rotórica de topologia interior apresenta diversas vantagens como visto anteriormente, permitindo obter-se motores de eficiência muito elevada que, a par dos últimos desenvolvimentos científicos, tornarão estes motores cada vez mais fiáveis, robustos e baratos.

2.4 - Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes é semelhante ao do motor síncrono eletroexcitado, sendo que a grande diferença surge pelo facto da força magnetomotriz do circuito indutor da máquina tomar sempre o mesmo valor, pois os ímanes permanentes apresentam sempre a mesma indução magnética ao longo do tempo de vida útil do motor. Assim, com a substituição do tradicional enrolamento de excitação pelos ímanes permanentes, ganha-se em robustez e eficiência mas, por outro lado, surge a impossibilidade de controlo do fator de potência, limitando a utilização desta máquina no funcionamento como gerador. No entanto, o desenvolvimento de conversores de frequência com a evolução da eletrónica de potência, veio solucionar esta limitação.

Normalmente, este motor possui um estator formado por um enrolamento trifásico que, estando ligado à rede, em condições normais, será percorrido por um sistema trifásico de correntes simétricas. Surge assim um campo magnético girante no entreferro que roda em pleno sincronismo com a frequência das correntes que circulam no induzido, o campo magnético de reação do induzido. Assim, como demonstrado anteriormente, à velocidade do campo magnético girante criado pelas correntes induzidas no estator, chama-se de velocidade de sincronismo ou velocidade síncrona.

Em regime permanente, ou seja, quando o rotor se encontra a rodar à velocidade de sincronismo, devido à presença dos ímanes permanentes que criam um sistema magnético polar com *p* pares de pólos (comummente 2 pares de pólos), é criado um campo magnético girante de excitação, o campo magnético principal da máquina. Consequentemente, por efeito da interação entre o campo magnético indutor e o campo magnético de reação do induzido surge um binário eletromagnético.

Da interação do campo magnético principal criado pelo rotor e do campo magnético de reação do induzido criado pelas correntes induzidas no estator surge um campo magnético resultante, que também roda à velocidade de sincronismo, n_s. A reação do induzido é magnetizante quando os seus efeitos são aditivos aos do campo indutor, e desmagnetizante quando os seus efeitos se opõem aos do campo indutor.

No funcionamento como motor, para um fator de potência indutivo, a reação do induzido é magnetizante, situação que se verifica com o motor utilizado no estudo experimental referente a este trabalho. Quanto maior for a corrente que circula no induzido maior será a força magnetomotriz que caracteriza este campo magnetizante.

2.4.1- Ângulo de binário

Como mostrado anteriormente, um sistema trifásico de correntes simétricas aplicado no induzido produzirá um campo magnético girante de reação do induzido, $B_{induzido}$. Existem, assim, dois campos magnéticos presentes na máquina, sendo que o campo magnético girante produzido pelo rotor, ou seja, o campo magnético indutor, $B_{indutor}$, irá tentar constantemente alinhar-se com o campo magnético do induzido, $B_{induzido}$. No entanto, estes dois campos magnéticos nunca ficam perfeitamente alinhados, pois mesmo sem carga acionada pelo veio, o rotor possui um binário resistente de perdas mecânicas, proporcionando um desfasamento entre os dois campos, embora rodando à mesma velocidade. Este desfasamento corresponde ao ângulo de binário, que é tanto maior quanto maior for o binário resistente oferecido pela carga. Portanto, como consequência da interação do campo magnético resultante no estator e do campo magnético indutor, desenvolve-se um binário eletromagnético motor. Este binário depende dos campos magnéticos do estator e do rotor, e do ângulo que formam entre si dada por (2.3).

$$T = k.B_{induzido}\ .B_{indutor}\ .\sin\lambda \tag{2.3}$$

A partir da equação 2.3 é possível obter-se um diagrama que traduz, magneticamente, o funcionamento do motor síncrono trifásico. Este diagrama encontra-se representado na **figura 2.14**, que traduz o funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes sub-excitado.

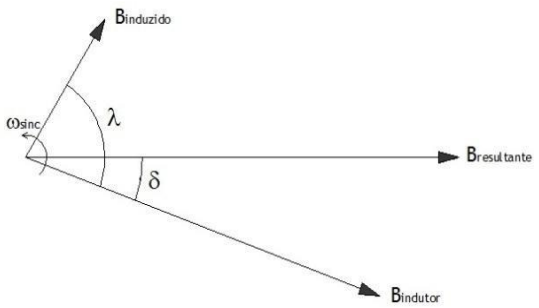


Figura 2.14 - Diagrama fasorial magnético do motor síncrono trifásico

Na **figura 2.15** encontra-se representado esquematicamente o desfasamento entre os campos magnéticos do estator e do rotor para duas situações distintas de carga. Assim, na **figura 2.15** (a), encontra-se representado um motor a acionar uma carga que oferece um determinado binário resistente, T_{R1}, originando um desfasamento de λ_1 entre os campos magnéticos, que originará um binário motor T_1. Por seu turno, na **figura 2.15** (b), pode-se verificar que o desfasamento é de λ_2, superior a λ_1. Este aumento do ângulo de binário deve-se a um aumento do binário resistente por parte da carga acionada pelo motor , originando,

assim, um aumento do binário motor ($T_{R2} > T_{R1}$). Conclui-se, assim, que ao aumentar o desfasamento entre os campos magnéticos indutor e de reação do induzido, aumenta-se também o binário motor desenvolvido. Este binário pode ser aumentado até um determinado limite - limite de estabilidade estática - no qual se garantem as condições de sincronismo.

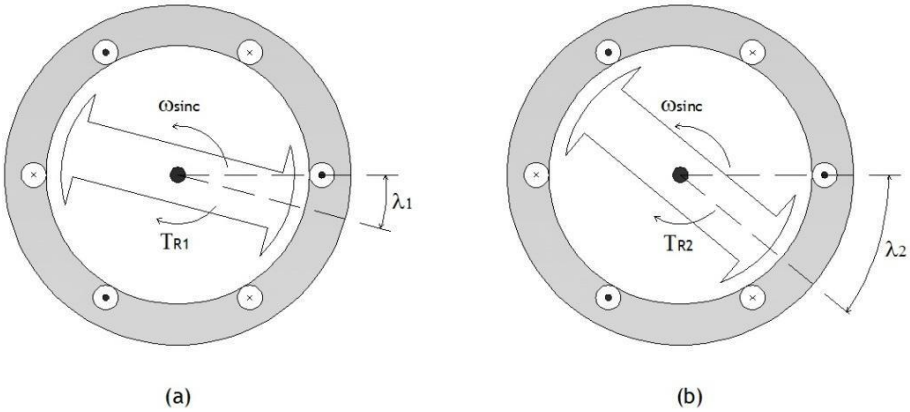


Figura 2.15 - Ângulo de binário

O ângulo de binário, do ponto de vista qualitativo, permite expor a reação magnetizante do induzido, se $\lambda<90^\circ$, e a reação do induzido desmagnetizante, se $\lambda>90^\circ$.

2.4.2 - Diagrama fasorial

O princípio de funcionamento base de um motor síncrono é praticamente igual ao do gerador síncrono, com a diferença de que o trânsito de potência tem sentido inverso. Estando o trânsito de potência invertido, será expectável que a corrente que circula no induzido também tenha sentido oposto. Assim, a equação elétrica que traduz o funcionamento do motor síncrono trifásico, em regime permanente simétrico e síncrono, desprezando a anisotropia, pode ser definida pela expressão (2.4).

$$\underline{U} = \underline{E_o} + (R_s + jX_s) \times \underline{I} \tag{2.4}$$

Onde:

$\underline{U}$ – é a tensão aos terminais do induzido;

$\underline{E_o}$ – é a força electromotriz;

$R_s \times \underline{I}$ – é a queda de tensão na resistência do induzido;

$jX_s \times \underline{I}$ – é a queda de tensão na reactância síncrona.

Uma forma de caracterizar o funcionamento do motor síncrono é através de um diagrama fasorial, que traduz a inter-relação dos fasores da equação 2.4. O respetivo diagrama encontra-se na **figura 2.16**.

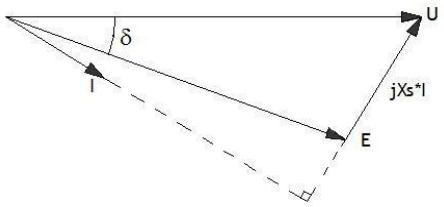


Figura 2.16 - Diagrama fasorial elétrico do motor síncrono trifásico

No entanto, como referenciado anteriormente, a maior parte dos motores síncronos de ímanes permanentes apresenta anisotropia magnética, não considerada até aqui, implicando que a reatância síncrona seja caracterizada por uma componente segundo o eixo longitudinal X_d e outra segundo o eixo transversal X_q . Esta premissa leva-nos a um diagrama fasorial um pouco mais complexo, que não será aqui apresentado, onde é evidenciada a influência das quedas de tensão nas reatâncias síncronas longitudinal, $jX_d\ \underline{I}$, e transversal, $jX_q\ \underline{I}$, que compõe o circuito do induzido.

Ao desfasamento entre a tensão aos terminais, U, e a força eletromotriz, E, denomina-se de ângulo de carga, δ. Este desfasamento corresponde à variação da posição rotórica (medida num referencial móvel à velocidade de sincronismo) quando a máquina síncrona passa da situação de funcionamento em vazio, caracterizada por $\underline{U} \equiv \underline{E_o}$, para a de funcionamento em carga.

2.4.3 - Anisotropia magnética

Até aqui, o estudo realizado sobre o princípio de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes foi feito considerando que não existe anisotropia magnética no entreferro da máquina, ou seja, que a relutância magnética no entreferro não varia com a posição do rotor e, consequentemente, a reactância síncrona X_s é constante. Isto acontece, por exemplo, nas máquinas síncronas convencionais de rotor cilíndrico e nas máquinas síncronas de ímanes permanentes de topologia periférica já apresentada anteriormente.

No entanto, a maior parte dos motores síncronos de ímanes permanentes possui anisotropia magnética. A componente fundamental do fluxo magnético do campo girante de reação do induzido varia com a posição do rotor, devido à variação da relutância magnética no entreferro provocada pela assimetria circunferencial do circuito magnético da estrutura rotórica. Na **figura 2.17**, encontra-se representada a estrutura de um motor síncrono de ímanes permanentes (2 pares de pólos), com uma das configurações rotóricas mais utilizadas.

Na figura encontram-se representados os eixos do referencial *dq* que roda à velocidade de

sincronismo, em regime síncrono. Da análise, conclui-se que a relutância é mínima quando a força magnetomotriz do estator coincide com o eixo transversal (q), sendo o fluxo máximo e, consequentemente, a reactância do induzido é máxima também. Por outro lado, quando a força magnetomotriz estatórica coincide com o eixo longitudinal (d), devido à baixa permeabilidade magnética dos ímanes, a relutância é máxima, sendo o fluxo mínimo e, consequentemente, a reactância do induzido é mínima.

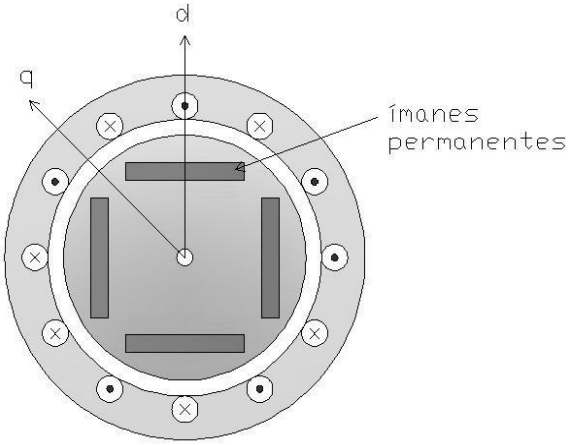


Figura 2.17 - Eixo longitudinal e transversal no rotor

Do exposto, conclui-se que o circuito magnético da máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta anisotropia inversa, quando comparado com a máquina síncrona convencional de pólos salientes. Pois, neste caso, a reatância síncrona transversal, é superior à reatância síncrona longitudinal. Logo, a razão de anisotropia, *r*, será caracterizada por um valor superior à unidade, sendo tanto maior quanto menor for a permeabilidade magnética apresentada pelos ímanes permanentes e, portanto, segundo o eixo longitudinal.

Com a decomposição da força magnetomotriz produzida pelo estator nas suas componentes longitudinal e transversal, o modelo de Blondel, através da teoria das duas reações, para a máquina síncrona convencional, põe em relevo uma interpretação física do fenómeno de reação do induzido, que é a seguinte: parte da reação do induzido (componente longitudinal) serve para sobreexcitar ou desexcitar o circuito magnético principal da máquina, enquanto a outra parcela (componente transversal) é a responsável pela criação de binário motor. Naturalmente, isto é válido para a máquina síncrona convencional. Para a máquina síncrona de ímanes permanentes, que apresenta anisotropia inversa, os parâmetros dependentes do circuito magnético segundo o eixo longitudinal são praticamente constantes, enquanto, que segundo o eixo transversal são variáveis. Logo, a interpretação deve ser oposta, considerando-se que, a reação do induzido segundo o eixo longitudinal é responsável pela criação de binário e, a componente segundo o eixo transversal, é a responsável pela excitação / desexcitação do campo magnético do entreferro.

2.5 - Características de funcionamento

A utilização da máquina de ímanes permanentes como motor tem vindo a ser estimulada pelo aumento das potências disponíveis, através da melhoria das características dos materiais magnéticos e por uma seleção adequada dos parâmetros da máquina.

A maioria das máquinas síncronas de ímanes permanentes apresenta uma topologia rotórica em que os ímanes se encontram embutidos nesta. Isto conduz a um circuito magnético anisotrópico e, em contraposição às máquinas síncronas convencionais de pólos salientes, esta anisotropia caracteriza-se pelo facto da reatância síncrona longitudinal ser inferior à reatância síncrona transversal, ou seja, por uma anisotropia inversa. Este tipo de anisotropia, associada a uma seleção apropriada dos parâmetros da máquina, pode oferecer vantagens nas suas características de funcionamento.

Uma das características mais importantes de um motor síncrono é a sua característica de binário em função do ângulo de carga, *T=f(δ)*. O binário eletromagnético desenvolvido pelo motor síncrono de ímanes permanentes é determinado pela potência disponível no entreferro e pela velocidade angular síncrona.

Da análise realizada a partir do Modelo de Blondel simplificado, obtém-se a potência eletromagnética por fase para o motor síncrono de ímanes permanentes. Esta potência eletromagnética, P_f, pode ser expressa por (2.5).

$$P_f = \frac{E_o U}{X_d} \sin\delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \sin 2\delta \qquad (2.5)$$

Onde:

- P_f – potência eletromagnética
- U – tensão aos terminais
- E_o - f.e.m. em vazio
- X_q - reatância síncrona segundo o eixo em quadratura
- X_d - reatância síncrona segundo o eixo direto
- $\sin\delta$ - ângulo de carga

Convém salientar que a potência ativa absorvida pela máquina foi considerada como potência elétrica integralmente transformada, pois as perdas por efeito de Joule nos circuitos do induzido da máquina foram desprezadas.

Da **expressão 2.5**, obtém-se o binário eletromagnético desenvolvido pela máquina, T_e, em regime permanente sinusoidal, para o motor síncrono trifásico de ímanes permanentes através da expressão (2.6).

$$T_e = \frac{3}{2\pi n_s}\left[\frac{E_o U}{X_d}\sin\delta + \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta\right] \quad (2.6)$$

Onde:

- T_e - binário eletromagnético desenvolvido pela máquina
- n_S - velocidade de sincronismo
- E_o - f.e.m. em vazio
- U - tensão aos terminais
- X_q - reatância síncrona segundo o eixo em quadratura
- X_d - reatância síncrona segundo o eixo direto
- $\sin\delta$ - ângulo de carga

Assim, se a máquina apresentar um circuito magnético isotrópico, apenas a componente de binário de excitação, T_{exc}, estará presente. Neste caso, o binário desenvolvido apresenta uma variação sinusoidal e atinge o seu valor máximo para um ângulo de carga igual a 90°.

No entanto, a máquina síncrona de ímanes permanentes apresenta anisotropia magnética, produzindo reação do induzido em quadratura, levando ao aparecimento da componente de binário de relutância, T_{rel}. Para estas máquinas, caracterizadas por uma razão de anisotropia $r = X_q / X_d > 1$, o binário resultante, T_e, atinge o seu valor máximo para ângulos de carga superiores a 90°. Como se pode ver na **figura 2.18**, para ângulos de carga superiores a 90°, a componente de binário de relutância, T_{rel}, é aditiva.

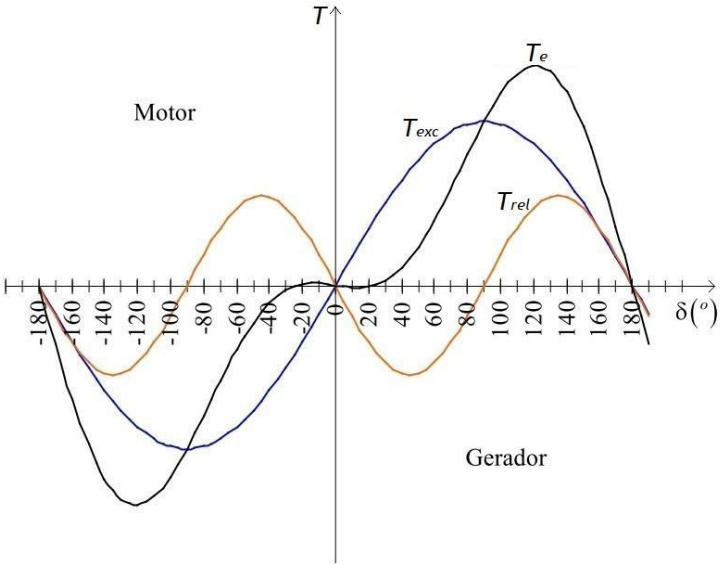


Figura 2.18 - Evolução das componentes de binário de uma máquina de ímanes permanentes com anisotropia inversa

Decorre do anterior que, a razão de anisotropia representa uma característica muito importante aquando do projeto da máquina. A sua importância evidencia-se pela influência que

esta característica tem na potência e binário desenvolvidos. Na **figura 2.19**, é possível observar-se a influência desta no binário desenvolvido. Assim, para *r*=1, a reatância é igual à reatância, logo o binário desenvolvido não vem afetado da componente de relutância. À medida que se vai aumentando a razão de anisotropia, ou seja, à medida que o valor da reatância X_q vai aumentando face ao valor da reatância, consegue-se aumentar também o binário máximo disponível.

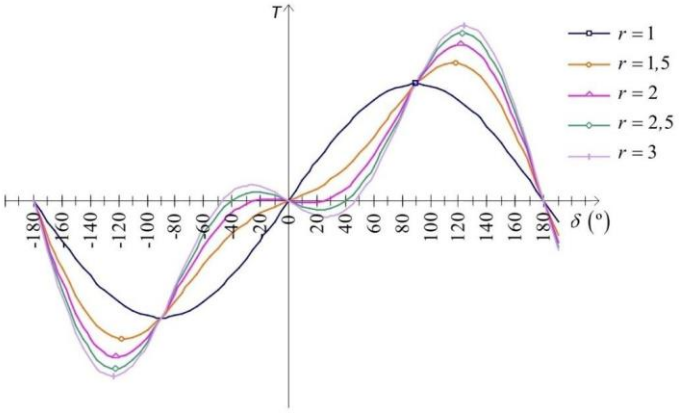


Figura 2.19 - Influência da razão de anisotropia no binário eletromagnético desenvolvido por uma máquina síncrona de ímanes permanentes

Quanto a outras importantes características de funcionamento de um motor síncrono de ímanes permanentes, pela análise do gráfico da **figura 2.20**, é possível concluir que a potência elétrica absorvida, P_{abs}, a corrente absorvida, I_{abs}, e o binário motor desenvolvido, T, aumentam com o aumento do fator de carga. O rendimento, η, também vai aumentando, atingindo o seu máximo entre os 75% e 100% da carga, começando a decair quando em sobrecarga. Para o motor síncrono de ímanes permanentes testado neste estudo, poderá verificar-se no próximo capítulo que o rendimento é máximo quando o motor trabalha em torno da plena carga.

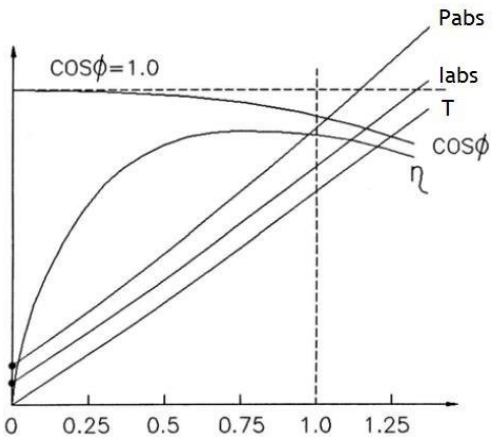


Figura 2.20 - Características de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes

Por fim, salienta-se o facto do fator de potência, cos φ, ser unitário até aproximadamente 50% da carga, começando a decrescer ligeiramente a partir daqui com o aumento da carga. Isto, permite concluir que a energia magnética fornecida pelos ímanes do motor, para baixos fatores de carga, é suficiente para alimentar o campo magnético necessário à conversão eletromagnética, não consumindo energia reativa da rede. No entanto, como se verá no capítulo seguinte, o fator de potência do motor testado é bastante baixo para baixos regimes de carga.

2.6 - Arranque de motores síncronos de ímanes permanentes

Um motor síncrono de ímanes permanentes, devido à inércia do rotor e ao binário resistente oferecido pela carga, à frequência da rede, não é capaz de arrancar e alcançar a velocidade de sincronismo. Para o rotor atingir esta velocidade, existe a necessidade de se recorrer a um sistema auxiliar de arranque.

De seguida apresentam-se os métodos utilizados no arranque:

- Arranque assíncrono
- Arranque síncrono
- Arranque com motor auxiliar

2.6.1 - Arranque assíncrono

O arranque assíncrono é o principal método utilizado para o arranque de motores síncronos de ímanes permanentes de baixa/média potência. Na literatura anglo-saxónica, estes motores que promovem arranque assíncrono são conhecidos como '*line-start permanent magnet synchronous motors*'. São motores caracterizados pelo seu rotor possuir uma gaiola, permitindo a realização de um arranque direto. No entanto, a utilização de um conversor de frequência será necessária no caso de se querer variar a velocidade de operação.

Para se produzir um binário de arranque assíncrono, o rotor necessita de estar equipado com uma gaiola como acontece nos motores de indução. Esta gaiola, para além de possibilitar o arranque do motor, também é eficaz no amortecimento das oscilações no modo de funcionamento síncrono, garantindo estabilidade na velocidade perante variações bruscas de carga.

As barras da gaiola nos motores do tipo '*line start*', normalmente, não se encontram inclinadas como acontece na gaiola dos motores de indução, pois a disposição dos ímanes permanentes axialmente embebidos no núcleo rotórico, não o permite. Como consequência, surge uma maior distorção harmónica no binário durante a fase inicial do arranque em comparação com os motores de indução. Outra desvantagem, surge do facto dos ímanes permanentes, durante o arranque, produzirem um binário resistente que diminui o binário de

arranque, reduzindo assim a performance para o rotor atingir o sincronismo.

A **figura 2.21** representa a característica mecânica de binário, na fase de arranque, de um motor síncrono de ímanes permanentes do tipo '*line start*' com 2 pares de pólos e 7,5kW de potência nominal.

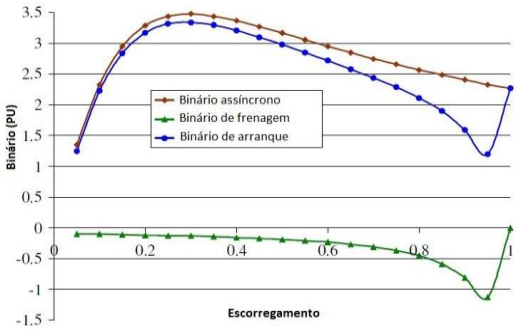


Figura 2.21 - Característica mecânica de binário durante o arranque - *T=f(s)*

Durante a fase de arranque, o binário de arranque T_s é constituído pelo binário assíncrono T_{ass} originado pela presença da gaiola, pelo binário de frenagem T_f originado pela reação do induzido devida à presença dos ímanes permanentes e pelo binário relutante T_{rel} originado pela diferente relutância nos eixos longitudinal *d* e transversal *q*, dada pela expressão (2.7).

$$T_s = T_{ass} + T_f \tag{2.7}$$

Para a criação do binário de arranque T_s, contribui principalmente a componente de binário assíncrono. Nas barras curto-circuitadas por anéis na gaiola circularão correntes elétricas devidas às forças eletromotrizes induzidas pelo campo girante. Para este binário, contribuem ainda as correntes de Foucault e as correntes devidas à reação do induzido, embora com menor significado.

Após a ocorrência do arranque assíncrono, a velocidade de rotação do rotor do motor terá sido elevada até um valor próximo da velocidade de sincronismo. Nesta fase sera necessário proceder-se ao sincronismo, que ocorre quando o binário síncrono e o binário assíncrono somados atingem o valor máximo. O binário síncrono tem uma variação alternada com valor médio nulo até à sincronização, não contribuindo para a aproximação da velocidade síncrona, mas sendo necessário para a sincronização e posterior funcionamento em regime permanente.

A gaiola rotórica, para além de permitir a criação do binário assíncrono, proporciona uma maior estabilidade no funcionamento do motor em regime permanente. Quando o rotor se encontra a rodar à velocidade de sincronismo, as tensões induzidas nas barras da gaiola serão nulas, não contribuindo desta forma para o binário motor. No entanto, se a velocidade rotórica

sofrer uma oscilação em torno da velocidade síncrona, irão ser induzidas forças eletromotrizes nas barras condutoras da gaiola, que produzirão um fluxo de corrente nas mesmas que, por sua vez, originarão um campo magnético responsável pela criação de um binário que tende a colocar novamente o rotor a rodar à velocidade de sincronismo.

A gaiola funciona assim como um amortecedor a oscilações que ocorram devido à variações bruscas da carga ou a transitórios que ocorram em regime permanente. Por esta razão, muitas vezes, se atribui, às barras ou enrolamentos que constituem a gaiola, o nome de barras ou enrolamentos amortecedores, com ação equivalente aos amortecedores *Leblanc*, clássicos nas máquinas síncronas convencionais.

O arranque assíncrono pode ser realizado através de ligação direta à rede elétrica, não sendo necessária a utilização de conversores eletrónicos. No entanto, tal método será de evitar devido às sobreintensidades e esforços mecânicos que podem atingir níveis elevados durante o arranque. Uma alternativa será a utilização de um autotransformador. Neste caso, a tensão será aumentada desde um valor nulo até à tensão nominal, permitindo obter um arranque rápido e com esforços menores para a máquina.

2.6.2 - Arranque síncrono

O arranque síncrono é realizado recorrendo à utilização de um conversor de frequência. Se o motor síncrono de ímanes permanentes não possuir gaiola rotórica, quando ligado diretamente à rede, não terá a capacidade de desenvolver um binário assíncrono como acontece nos motores do tipo '*line start*', pelo que não arranca. Assim, para os motores que não possuem gaiola rotórica, a utilização de um conversor de frequência é necessária, tanto para se realizar o arranque como para se proceder à variação da velocidade.

Se o campo girante no entreferro rodar a uma velocidade suficientemente baixa, o rotor não terá problema em acelerar e acompanhar a velocidade de sincronismo imposta pela frequência de alimentação. Após o rotor começar a girar, a velocidade do campo girante pode ser aumentada de forma gradual, aumentando a frequência de alimentação até ao seu valor nominal, 50Hz no caso de Portugal.

Quando um motor síncrono é operado a velocidades inferiores à velocidade nominal, a tensão aplicada aos seus terminais deve variar linearmente com a frequência aplicada, isto é, o quociente U/f deve ser mantido, de forma a evitar saturação excessiva no circuito magnético e sobreintensidades nos enrolamentos do estator. Ao mesmo tempo, preserva-se o binário máximo desenvolvido pelo motor.

2.6.3 - Arranque com motor auxiliar

O arranque com motor auxiliar, como o próprio nome indica, é efetuado através do acoplamento entre os veios de um motor auxiliar e do próprio motor síncrono que se deseja arrancar. O motor auxiliar que, por exemplo, pode ser um motor assíncrono, tem assim a missão

de elevar a velocidade do motor síncrono para lá da velocidade síncrona. Quando esta for ultrapassada, pode ser realizado o paralelo do motor síncrono com a rede a que este se encontra ligado, e o motor auxiliar pode ser desacoplado. Assim que o motor auxiliar for desligado, a velocidade do rotor diminuirá até este atingir a velocidade síncrona, começando a operar como motor. Quando o paralelo com a rede tiver sido efetuado, a carga pode ser acoplada ao veio do motor síncrono.

Este método é atualmente pouco utilizado, tendo alguma aplicação no arranque de grandes motores. Os conversores eletrónicos revolucionaram este campo, pois possuem diversas vantagens face ao motor auxiliar. O seu baixo preço, manutenção praticamente inexistente e a possibilidade de controlo da velocidade permitem colocar o motor a funcionar numa gama de velocidades muito grande.

No caso dos motores síncronos de ímanes permanentes, é comum os fabricantes lançarem para o mercado uma solução composta pelo motor e por um conversor de frequência, dando a oportunidade ao utilizador de colocar o motor a trabalhar à velocidade desejada dentro da gama para a qual foi projetado.

2.6.4 - Análise comparativa com outros motores eléctricos

Os motores elétricos são amplamente utilizados em todos os setores industriais para converter energia elétrica em energia mecânica. Neste sentido, e tendo em conta o contexto da atual política energética centrada na poupança e no uso racional da energia, os fabricantes têm desenvolvido motores cada vez mais eficientes com o objetivo de estes permanecerem em conformidade com as normas eletrotécnicas vigentes.

Como já foi dito, os motores de indução representam a maior parte dos motores elétricos em funcionamento, devido às suas características de elevada fiabilidade e baixa manutenção a um custo acessível. Trata-se de motores que se encontram num estado de maturação muito avançado, pelo que investigadores e fabricantes já os exploraram ao máximo. Sendo assim, um aumento da sua eficiência energética, pode implicar um aumento do custo final, imputando aos fabricantes a necessidade de se focarem em alternativas economicamente viáveis.

Os motores síncronos têm sido objeto de diversos estudos científicos, sendo que vários fabricantes têm apostado neste segmento para obterem motores com altos índices de eficiência energética. A máquina síncrona convencional desde sempre teve pouca expressão na utilização como motor, devido às desvantagens apresentadas face ao motor de indução. No entanto, recentemente, têm surgido no mercado motores síncronos capazes de superarem largamente os níveis de eficiência energética dos motores de indução a um preço competitivo, os motores síncronos de ímanes permanentes. Outros fabricantes, têm também apostado no segmento dos motores síncronos de relutância.

No seguimento, é efetuado um estudo comparativo do motor síncrono de ímanes permanentes com as diversas soluções concorrentes.

2.7 - Motor síncrono de ímanes permanentes vs motor de indução

O motor de indução foi, durante muitos anos, a solução preferencial para utilização em acionamentos eletromecânicos de baixa/média potência devido à sua elevada robustez e fiabilidade, manutenção reduzida e um preço relativamente baixo.

No entanto, com a atualização de normas regulamentares, como a IEC60034-30 (África, parte da América do Sul, parte da Ásia e Europa) ou a NEMA Premium (Estados Unidos da América e Canadá), que regulam os níveis de eficiência energética em máquinas elétricas, novos motores mais eficientes têm sido alvo de estudo e desenvolvimento.

Segundo a norma IEC60034-30, a eficiência energética nos motores de indução pode ser classificada por três índices: IE1 (eficiência standard), IE2 (eficiência elevada) e IE3 (eficiência premium). No entanto, recentemente, a Comissão Eletrotécnica Internacional atualizou esta norma (IEC60034-31), adicionando-lhe um novo nível de eficiência superior - IE4 (eficiência super premium).

A recente norma IEC 60034-31 recomenda que as perdas, para um motor atingir o nível de eficiência IE4, devem ser reduzidas entre 10% a 15% comparativamente com aquelas especificadas no nível IE3. Assim, para se conseguir uma redução significativa destas num motor de indução, por si só já tão explorado, será necessário utilizar condutores de cobre de secção superior, as lâminas que constituem o núcleo ferromagnético devem ser otimizadas e, eventualmente, a utilização de gaiolas em cobre fundido deve ser ponderada.

Estas alterações podem levar o motor de indução a atingir o nível de eficiência IE4, no entanto, maiores carcaças serão necessárias devido ao aumento do material ativo utilizado, o que implicará um aumento do custo total da máquina.

Uma alternativa viável que consegue atingir o nível de eficiência IE4 especificado na norma IEC60034-31 e, até mesmo superá-lo, é o motor síncrono de ímanes permanentes. Diversos fabricantes têm lançado no mercado motores síncronos de ímanes permanentes do tipo '*line-start*' que são caracterizados por um elevado rendimento e fator de potência, elevada robustez, fiabilidade e manutenção reduzida a um preço capaz de competir com o motor de indução.

Comparativamente com o motor de indução, o motor síncrono de ímanes permanentes apresenta um tamanho mais reduzido. A sua estrutura rotórica não inclui enrolamento indutor, pelo que as perdas de joule são nulas. A natureza síncrona da máquina também faz com que as correntes na gaiola rotórica, quando existe, sejam nulas, ou seja, a presença desta gaiola não afeta o rendimento em regime estacionário. Pode apresentar uma distância no entreferro superior, tornando-o num motor mais fiável. Um aumento do entreferro minimiza o efeito de reação da armadura, reduzindo assim a reatância síncrona (se necessário) e aumentando a estabilidade.

A velocidade é constante, independentemente do binário de carga. Em condições de alimentação com frequência constante e ignorando o efeito de anisotropia, o binário motor é diretamente proporcional à tensão de alimentação. Nos motores de indução, a velocidade

diminui à medida que o binário de carga aumenta, sendo o binário motor diretamente proporcional ao quadrado da tensão de alimentação. Isto significa que uma pequena oscilação na tensão de entrada implica uma maior variação do binário motor, contribuindo para uma maior instabilidade.

No que ao fator de potência e rendimento diz respeito, o motor síncrono de ímanes permanentes supera o motor de indução. O seu principal ponto fraco ainda se prende com o preço, mas devido ao seu maior rendimento e fiabilidade, o investimento inicial superior acaba por ser recompensado a longo prazo.

Segundo o autor, o estudo realizado permitiu perceber as vantagens obtidas com a utilização de um motor síncrono de ímanes permanentes do tipo 'line-start' face a um motor de indução. De seguida são demonstrados alguns dos resultados deste estudo comparativo, que para além de comparar os resultados obtidos experimentalmente, também os compara com aqueles obtidos numa análise FEA (*Finite Element Analysis*) do motor síncrono.

a) Comparação do fator de potência

Segundo o autor, o teste realizado com um motor síncrono de ímanes permanentes utilizado tem uma potência nominal de 7,5kW. O motor de indução é um motor de elevada eficiência energética (índice IE3) e apresenta iguais valores de potência nominal, de tensão nominal, de velocidade de sincronismo (igual número de par de pólos), mas tem um núcleo ferromagnético maior.

A **figura 2.22** compara os resultados obtidos para o fator de potência. Como se pode verificar, os resultados experimentais do motor síncrono de ímanes permanentes (IE4 LSPM Test) são muito próximos daqueles obtidos através da análise FEA (IE4 LSPM Design), mas comparando-os com os resultados experimentais relativos ao motor de indução (Premium IM), a diferença é grande, principalmente para um baixo fator de carga.

O motor de indução apresenta assim um grande problema que se prende com o facto do seu fator de potência ser sempre indutivo, significando que, mesmo em condições de funcionamento em vazio, existirá sempre uma componente reativa da corrente a circular nos enrolamentos estatóricos. Isto implica um menor binário para uma mesma corrente quando comparado com o motor síncrono de ímanes permanentes ou, em alternativa, será necessária uma maior intensidade de corrente para se obter o mesmo binário motor. Isto também exige condutores com secções reforçadas.

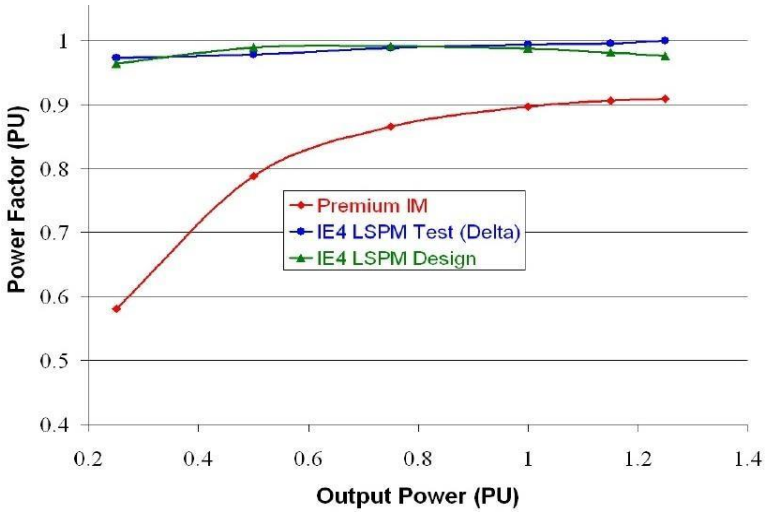


Figura 2.22 - Comparação do fator de potência

b) Comparação do redimento

A **figura 2.23** apresenta graficamente os resultados obtidos do rendimento em função da potência de saída (potência mecânica) para ambos os motores. Para o motor síncrono de ímanes permanentes, os resultados experimentais são ligeiramente superiores aos resultados obtidos através do cálculo avançado FEA. No caso do motor de indução, é possível verificar que os resultados experimentais obtidos são muito inferiores quando comparados com os resultados experimentais do motor síncrono.

Segundo a norma IEC 60034, para um motor de 7,5kW atingir o índice IE4, este deve ter um rendimento estipulado de 92% no mínimo. No caso do índice IE3, o rendimento deve atingir os 90,5%. Pela análise gráfica, é possível verificar que o motor síncrono de ímanes permanentes facilmente supera o índice IE4 numa larga gama de valores de potência mecânica. Já o motor de indução, supera o índice IE3, no entanto, não consegue atingir o índice IE4.

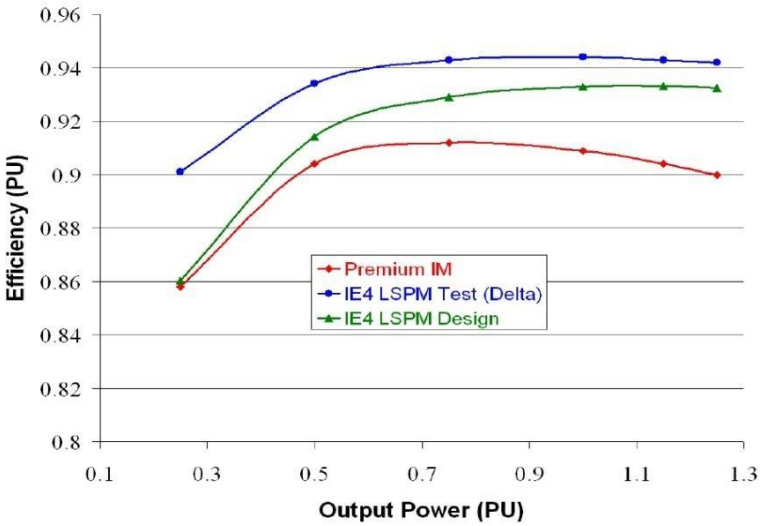


Figura 2.23 - Comparação do rendimento

c) Comparação da corrente do induzido

A **figura 2.24** representa graficamente a comparação entre as correntes que circulam nos enrolamentos do estator em regime permanente, para uma gama de potência mecânica que vai de 0,25 até 1,25 p.u. (por unidade).

Como se pode concluir através da análise gráfica, o motor de indução apresenta sempre um valor de corrente superior face ao motor síncrono de ímanes permanentes. Com isto, as perdas óhmicas serão superiores, causando assim um rendimento inferior.

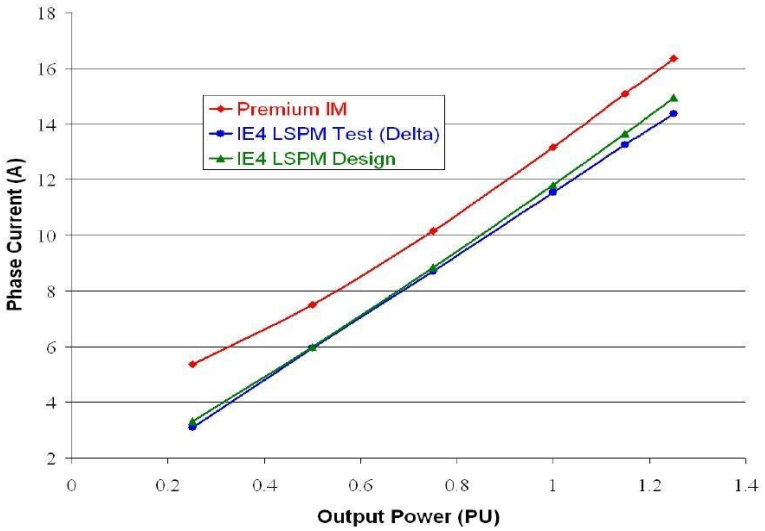


Figura 2.24 - Comparação da corrente do induzido

Posto isto, sob o ponto de vista da poupança energética, do investimento inicial e do custo de operação a longo prazo, o motor síncrono de ímanes permanentes do tipo 'line-start' torna-

se cada vez mais numa solução economicamente viável e vantajosa, podendo substituir os motores de indução existentes num elevado número de aplicações que exijam velocidade constante ou velocidade variável.

2.8 - Motor síncrono de ímanes permanentes vs motor síncrono de relutância

Apesar da supremacia dos motores de indução nos acionamentos industriais, a procura de motores cada vez mais eficientes e mais robustos tem motivado a pesquisa de novas máquinas. De entre estas, os motores de relutância têm vindo a receber um interesse crescente devido às suas principais vantagens: baixo custo de fabrico, construção simples e robusta, alta fiabilidade, baixa manutenção e desempenho elevado.

As máquinas síncronas de relutância constituem uma variante das máquinas síncronas. Neste caso, os enrolamentos de excitação foram suprimidos como acontece nos motores síncronos de ímanes permanentes e explora-se o efeito de relutância, com a construção da máquina de uma forma muito assimétrica do ponto de vista magnético. A reatância transversal chega a ser 10 a 12 vezes superior à reatância longitudinal. Existem várias soluções construtivas, atingindo-se uma boa uniformidade mecânica. Na **figura 2.25** pode ser visualizado um motor síncrono de relutância construído pela ABB, com uma das configurações rotóricas mais utilizadas devido à elevada anisotropia magnética obtida.

Figura 2.25 - Motor síncrono de relutância; Fonte: ABB

A par dos motores síncronos de ímanes permanentes, os motores síncronos de relutância mais recentes são motores mais pequenos e leves quando comparados com o motor de indução, apresentando maior densidade de potência. Apresentam um fator de potência e rendimento muito elevados e podem ser utilizados numa larga gama de velocidades. Uma desvantagem do motor síncrono de relutância está relacionada com a necessidade de uma maior intensidade de

corrente para obter o mesmo binário que um motor de ímanes permanentes, visto que o indutor encontra-se no estator.

Estruturalmente, são motores que possuem um estator muito idêntico ao utilizado no motor síncrono de ímanes permanentes. A sua grande diferença encontra-se na estrutura rotórica, pois não possui gaiola ou ímanes permanentes. Torna-se, assim, construtivamente um motor muito mais robusto. Além disso, não existe o risco de redução do desempenho, devido à possibilidade de ocorrer desmagnetização parcial dos ímanes permanentes em caso de sobreaquecimento ou avaria.

A ausência de ímanes permanentes no rotor torna o funcionamento deste motor mais seguro, uma vez que não existe a indução de forças contra-eletromotrizes no estator, tornando desnecessária a proteção do conversor em relação a sobretensões.

Por fim, os materiais magnéticos baseados em terras-raras utilizados para a produção de ímanes permanentes são relativamente dispendiosos e o seu fornecimento, em determinadas situações, pode não conseguir fazer frente à procura.

O motor síncrono de relutância é um motor energeticamente muito eficiente, conseguindo alcançar e superar o índice IE4 da norma IEC 60034. Para isto, em muito contribuiu a otimização da sua estrutura rotórica que, devido à inexistência de gaiola e de ímanes permanentes, permitiu o desenvolvimento de motores capazes de competirem tanto com os motores de ímanes permanentes como com os motores de indução.

Como o rotor não possui qualquer tipo de circuito elétrico, a componente de perdas óhmicas é nula. Com isto, consegue-se obter uma estrutura rotórica energeticamente muito eficiente, mais simples e barata. Outro fator que contribui para esta simplicidade construtiva, está relacionada com a inexistência dos ímanes permanentes, que permite obter rotores com uma inércia mais baixa e de maior fiabilidade.

Uma das grandes vantagens que resulta da eliminação das perdas óhmicas no rotor está relacionada com o baixo nível de aquecimento. O funcionamento a baixa temperatura aumenta a vida útil do isolamento do motor, aumenta a duração das chumaceiras e os intervalos entre lubrificações.

Em particular, as chumaceiras do motor necessitam de manutenção regular e representam aproximadamente 70% de todas as paragens não programadas dos motores. Uma menor temperatura das chumaceiras traduz-se diretamente em maiores intervalos entre lubrificações, manutenção mais reduzida e maior fiabilidade. Inclusivamente, se for necessário mudar uma chumaceira, ao não existirem forças magnéticas, ao contrário do que acontece num motor síncrono de ímanes permanentes, a alteração é tão fácil como num motor de indução.

2.9 - Motor síncrono de ímanes permanentes vs motor síncrono convencional

Para aplicações de baixa/média potência, o motor síncrono de ímanes permanentes surge como uma solução muito mais vantajosa quando comparada com o motor síncrono convencional. A inexistência de enrolamento indutor traduz-se em maior eficiência energética, pois as perdas óhmicas no rotor são nulas no caso do motor de ímanes permanentes.

Assim, o aquecimento interno será menor, pelo que o sistema de ventilação necessário será menos complexo. Outra enorme vantagem prende-se com o nível de manutenção que, no motor síncrono convencional, devido à presença do sistema de anéis/escovas que é suscetível de grande desgaste, é muito frequente.

Na **figura 2.26**, pode ser visualizado um motor síncrono convencional. A sua utilização torna-se vantajosa em aplicações de elevada potência, onde elevados valores de binário motor são necessários. Devido às suas características de funcionamento, são utilizados, maioritariamente, em grandes acionamentos industriais, nomeadamente na indústria pesada.

Figura 2.26 - Motor síncrono convencional; Fonte: WEG

Os grandes motores síncronos são bastante eficientes em aplicações que necessitem de binário elevado, corrente de arranque reduzida, velocidade constante mesmo com grandes variações de carga e elevado rendimento.

O motor síncrono convencional também possibilita o melhoramento do fator de potência das instalações onde é utilizado. Se o enrolamento indutor for sobre-excitado, o motor

comporta-se como compensador síncrono, podendo assim ser utilizado para correção do fator de potência.

2.10 - Imposição no mercado: MSIP vs motor de relutância

Os motores de indução ocupam atualmente entre 80% a 85% de todos os motores elétricos em funcionamento. Para se manterem competitivos e responderem à atual política energética, baseada na poupança da mesma, os fabricantes necessitam de inovar constantemente a sua oferta, produzindo motores com um nível de eficiência cada vez mais elevado e de maior fiabilidade, ao menor custo possível.

Com o aparecimento dos materiais magnéticos permanentes baseados em terras-raras, nomeadamente o neodímio, os fabricantes voltaram o seu interesse para o desenvolvimento de motores de ímanes permanentes. Os motores síncronos de ímanes permanentes são motores que apresentam um rendimento muito elevado, superando o índice IE4 da norma IEC 60034, numa gama de potências muito alargada. Apresentam uma elevada robustez construtiva, assim como uma elevada fiabilidade e um baixo nível de manutenção. Devido ao elevado produto energético máximo conseguido com os ímanes permanentes baseados em terras-raras, estes motores podem ser utilizados em aplicações de binário considerável. Por fim, apresentam um fator de potência muito elevado, devido ao campo criado pela presença dos ímanes permanentes. A problemática do controlo foi, também, ultrapassada, com o desenvolvimento dos dispositivos eletrónicos de potência.

No entanto, quando o objetivo dos fabricantes passa pela produção em massa, para além das principais características de funcionamento, outros fatores tais como o custo de produção, fiabilidade, disponibilidade e custo dos materiais utilizados na sua construção, devem ser ponderados.

Um dos fatores que tem estado no centro das preocupações por parte dos fabricantes dos motores de ímanes permanentes, prende-se com a recente instabilidade do preço e da disponibilidade dos elementos de terras raras, tais como o neodímio e o disprósio. Estes elementos, principais constituintes dos ímanes permanentes baseados em terras-raras, viram o seu preço atingir máximos históricos em 2011. A China, principal produtor destes ímanes permanentes, devido à sua crescente necessidade, viu-se obrigada a restringir a sua disponibilidade. Posto isto, e tendo em conta que a procura é muito elevada, o preço disparou, atingindo valores preocupantes para os fabricantes que têm apostado neste tipo de motores.

Tendo em conta este cenário, algumas empresas como a ABB anteciparam-se, tendo apostado nos motores síncronos de relutância. A contínua investigação, a par da aposta dos fabricantes nesta tecnologia, levou ao desenvolvimento de motores síncronos de relutância capazes de concorrer tanto com os motores de indução como com os motores síncronos de ímanes permanentes.

Face aos motores síncronos de ímanes permanentes, apresentam a vantagem de possuírem um rotor mais robusto, mais pequeno e mais fiável visto que não possuem ímanes permanentes

ou qualquer tipo de enrolamento. Outra prende-se com os requisitos técnicos que em sede de manutenção, como dito, devido à ausência dos ímanes e dos fortíssimos campos magnéticos por estes criados, se torna uma solução mais simples e barata. Assim, a não dependência de materiais caros e de disponibilidade reduzida, é vista como uma vantagem que pode fazer a diferença num futuro a médio/longo prazo no mercado de motores elétricos.

2.11 – Em síntese

Este capítulo direcionou-se, essencialmente, para a máquina síncrona de ímanes permanentes, em modo de funcionamento como motor. Foram estudados os seus aspetos construtivos, dando especial atenção à constituição das topologias rotóricas mais comuns.

O princípio de funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes foi descrito. Quanto às características de funcionamento, deu-se especial relevo à característica do binário em função do ângulo de carga. O binário relutante resultante do circuito magnético anisotrópico foi evidenciado".

Daqui se conclui que o motor de ímanes permanentes, face aos que foram apresentados, deverão ser utilizados nos elevadores porque estão isentos de perdas por efeito de joule, perdas magnéticas e a sua velocaidade varia com a frequência e não com o aumento do binário de carga, havendo sincronismo entre a velocidade do campo girante e a velocidade do veio. São por isso motores de elevada eficiência energética mas o seu preço ainda não é competitivo face aos motores de indução.

Capítulo 3

A eficiência energética

3.1 – Introdução

Citando o artigo publicado na revista "O Electricista" da autoria do Eng.º Miguel Leichsenring Franco " Segundo um estudo recente da União Europeia, o sector dos edifícios será responsável por cerca de 40% do consumo total de energia neste espaço geográfico. Cerca de 70% do consumo de energia deste sector verificar-se-á nos edifícios residenciais. Em Portugal, mais de 28% da energia final e 60% da energia eléctrica é consumida em edifícios.

Por forma a dar cumprimento ao Protocolo de Kyoto, no qual se definiu uma drástica redução da emissão de CO_2, a Comunidade Europeia emanou várias directivas que se relacionam directa ou indirectamente com a temática da utilização de energia. As mais importantes são entre outras, a Directiva 2002/91/CE de 16 de Dezembro de 2002 - *"EPB - Energy Performance of Buildings"* (Desempenho Energético de Edifícios), transposta parcialmente para o direito nacional pelo Decreto-Lei N.º 78/2006 de 04 de Abril, e a Directiva 2005/32/CE de 06 de Julho de 2005 – *"EuP - Energy Using Products"* (Requisitos de concepção ecológica dos produtos que consomem energia).

Os ascensores não são referidos explicitamente nestas duas directivas, quando se aborda a temática do aumento da eficiência energética. Na Directiva EPB são referidos essencialmente equipamentos técnicos dos edifícios como sistemas de aquecimento, climatização e iluminação, bem como sistemas de isolamento térmico dos edifícios. Na EuP, por sua vez, também não se indicam especificamente os ascensores, embora sejam referidos por exemplo motores eléctricos, que farão parte integrante de um ascensor.

De acordo com um estudo da S.A.F.E – "Agência Suiça para a Utilização Eficiente da Energia", realizado em 2005, os ascensores podem representar uma parte significativa do consumo de energia num edifício (o consumo energético de um ascensor pode representar em média 5% do consumo total de energia de um edifício de escritórios).

Na Suíça estima-se que o somatório do consumo de energia dos cerca de 150.000 ascensores instalados, representa cerca de 0,5% do total de 280 GWh de consumo energético do país.

A redução do consumo de energia nos edifícios poderá ser obtida através da melhoria das características construtivas, reduzindo dessa forma as necessidades energéticas, através de medidas de gestão da procura, no sentido de reduzir os consumos na utilização e através do recurso a equipamentos energeticamente mais eficientes.

No preâmbulo da Directiva EuP refere-se que *"a melhoria da eficiência energética e que uma das opções disponíveis consiste na utilização final mais eficiente da electricidade - é*

considerada um contributo importante para a realização dos objectivos de redução das emissões de gases com efeito de estufa na Comunidade."

Daí que seja importante estudar também a otimização e a eficiência energética de ascensores.

3.2 – Alguns conceitos

3.2.1 – Standby

Estado em que se encontra o ascensor quando não está em movimento (ascendente ou descendente). O consumo de energia eléctrica de *standby* poderá ser ocasionado por vários componentes do ascensor, nomeadamente:

1. Comando do ascensor;
2. Sinalização (*Displays*) instalados nos patamares;
3. Botões de chamada nos patamares;
4. Painel de cabina, com os botões de chamada e os *displays* respectivos;
5. Cortina fotoeléctrica;
6. Variador de frequência;
7. Luz de cabina constantemente ligada;
8. Motor da porta de cabina constantemente em carga, para garantir que a porta se mantém fechada;

3.2.2 – VVVF: Variação de velocidade por variação de frequência

Método de regulação do sistema de tracção, normalmente utilizado em ascensores eléctricos de roda de aderência. Mediante o recurso a variadores de frequência é possível alimentar o motor com uma gama alargada de frequências, obtendo-se diferentes velocidades de funcionamento, com baixas perdas e baixo consumo e com um elevado conforto de funcionamento (menores ruídos durante o funcionamento, uma paragem mais exacta ao piso e uma maior suavidade de andamento).

3.2.3 - Variadores eletrónicos regenerativos

O consumo de energia em ascensores pode ser drasticamente diminuído com a conjugação de diversas tecnologias. Existe uma nova gama de variadores eletrónicos de velocidade (VEV) que permitem que a energia resultante da travagem seja injectada na fonte. São os denominados variadores electrónicos regenerativos.

Esta característica permite uma poupança significativa (até cerca de 40% face à situação convencional) em aplicações com um número elevado de travagens frequentes. Contudo, este

modo de funcionamento só será possível se o sistema de tracção o permitir.

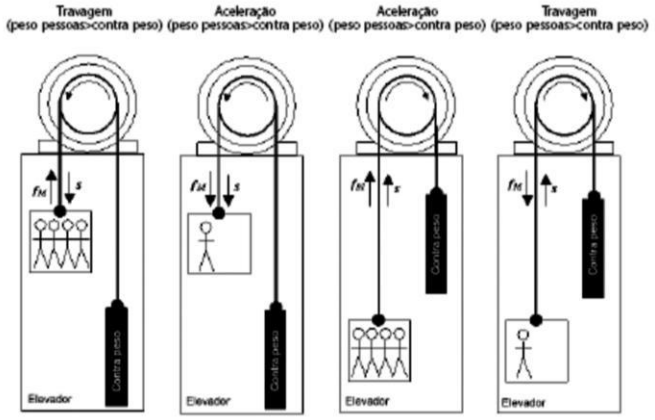


Figura 3.1 - Recuperação de energia num ascensor eficiente; Fonte: BCSD Portugal.

Quando o ascensor eléctrico de roda de aderência está a descer e o peso da carga é maior do que o contrapeso, então o binário do motor está em direcção contrária à velocidade, isto é, o motor está a travar. Do mesmo modo quando o motor está a subir sem carga, haverá lugar a uma poupança significativa de energia.

Será, segundo o Eng.º Castanheira e o Professor Borges Gouveia (2004), uma estratégia de consumir o mínimo possível de energia para a realização de qualquer trabalho, quer através da supressão de consumos, quer através da utilização de tecnologias mais eficientes.

Foi definido pelo WBCSD – World Business Council for Sustainable Development, como sendo uma filosofia de Gestão que deve encorajar o mundo empresarial a procurar melhorias ambientais que potenciem, paralelamente, benefícios económicos. Incentiva a Inovação e, por conseguinte, o crescimento e a competitividade. Trata-se de um conceito empresarial que visa acrescentar mais valor, utilizando menos energia e provocando um menor impacto ambiental.

3.2.4 – Utilização racional de energia

A utilização racional de energia (URE) consiste num conjunto de acções e medidas, que têm como objectivo a melhor utilização da energia, sendo um factor importante de economia energética e de redução de custos.

3.2.5 – Auditoria energética

A auditoria energética permite fornecer informação específica e identificar as possibilidades reais de economizar energia, consistindo basicamente num exame crítico à forma como é utilizada a energia com base no registo, tanto quanto possível rigoroso, dos consumos e custos. Tem por objectivos:

a. Determinar as formas de energia utilizadas;
b. Examinar o modo como a energia é utilizada e os respectivos custos;
c. Estabelecer a estrutura do consumo de energia;
d. Determinar os consumos por processo, operação ou equipamento;
e. Relacionar o consumo de energia com a produção e/ou com o nível de funcionamento da instalação;
f. Identificar as possibilidades de melhoria dos rendimentos das conversões energéticas;
g. Analisar técnica e economicamente as soluções desenvolvidas;
h. Estabelecer metas para os consumos de energia sem alterações de processo;
i. Propôr um programa de actuação para as acções e investimentos a empreender;
j. Propôr, se inexistente, um esquema operacional para a gestão da energia na empresa.

3.2.6 - Otimização energética

De acordo com o Dicionário Priberam da Língua Portuguesa, otimização passa por *"[...] dar a uma máquina o rendimento ótimo, criando as condições mais favoráveis ou tirando o melhor partido possível"*. A optimização energética será entendida como sendo os procedimentos que visam a redução do custo e do consumo de energia, procurando obter-se o melhor resultado, maximizando o efeito útil (transformação da energia elétrica em energia mecânica, por exemplo) e minimizando as perdas do sistema (eletromecânico).

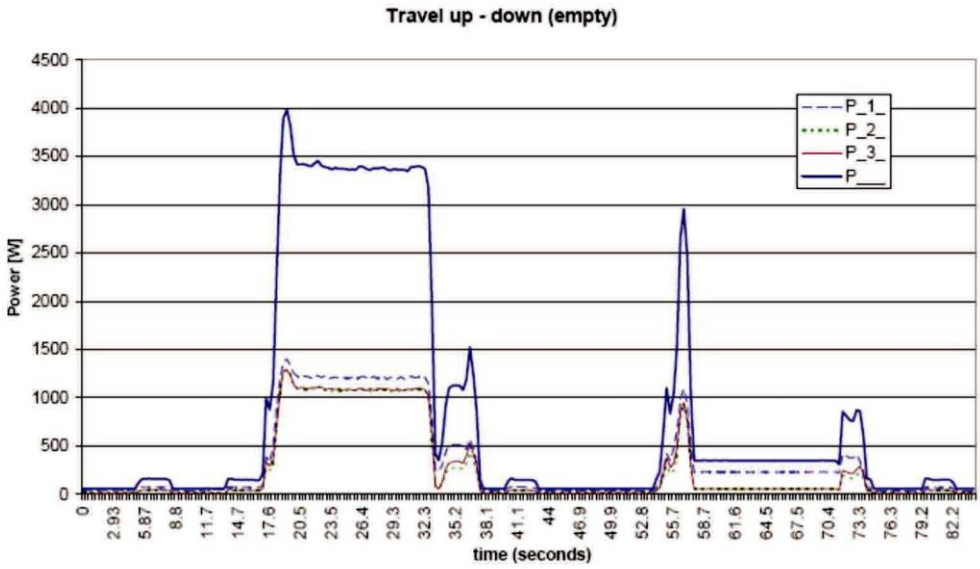


Figura 3.2 - Medições para uma manobra de um ascensor eléctrico de roda de aderência na subida e na descida (cabina vazia). Com P1 = potência fase 1, P2 = potência fase 2, P3 = potência fase 3, P = Potência total

3.2.7 - Estudo realizado em Portugal

Os Engenheiros Franco e Ferreira realizaram em 2009, e em Portugal, com o apoio da empresa Schmitt+Sohn Elevadores, Lda. um estudo sobre o consumo energético de ascensores. Com esse estudo pretendeu-se desenvolver:

1. Uma metodologia que permitisse optimizar o consumo energético de um dado ascensor existente e apresentar sugestões de optimização, considerando também uma análise económica. O simulador construído especificamente para o efeito foi válidado com a norma VDI 4704, bem como as medições realizadas para o efeito numa amostra de ascensores instalados pela Schmitt-Elevadores, Lda.;
2. Uma metodologia que permitisse optimizar o consumo energético de um novo ascensor na fase de desenvolvimento. Foi construído um simulador em Matlab/Simulink, com o objectivo de estudar e validar diferentes cenários que conduzissem à optimização do consumo energético do ascensor. Este simulador foi validado com dados obtidos do estudo aprofundado de um ascensor já existente.

Foi seleccionada uma amostra representativa composta por 21 ascensores da carteira de ascensores em manutenção da empresa Schmitt+Sohn Elevadores, Lda. Foram utilizados os seguintes critérios para a determinação desta amostra:

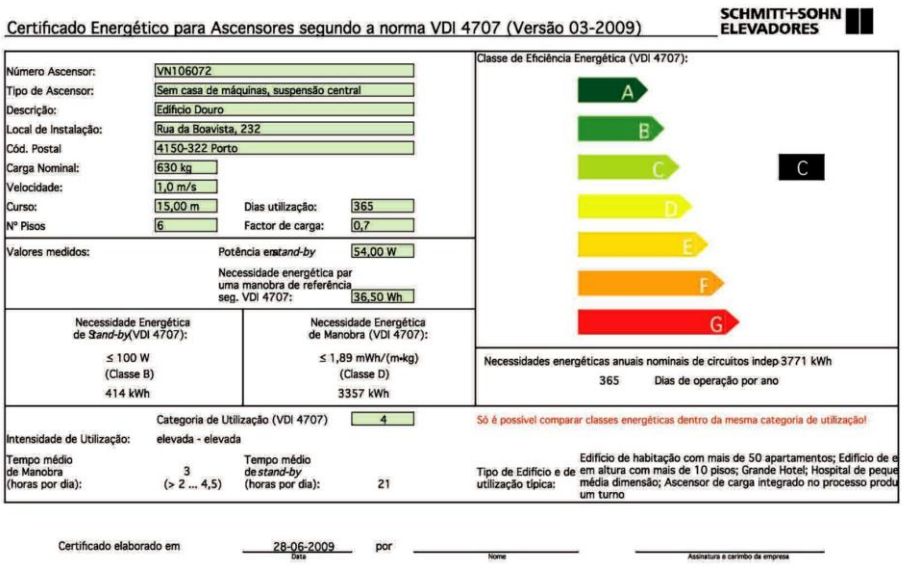
a. Tipo de Edifício;
b. Idade do Ascensor;
c. Arquitectura do sistema;
d. Tecnologia de tracção;
e. Tipo de máquina;
f. Carga nominal.

Para a determinação do consumo de energia, procedeu-se, em cada ascensor à:

a) Medição do consumo de uma viagem da cabina em vazio (em todo o seu curso)–viagem ascendente e descendente (alimentação trifásica);
b) Medição do consumo em *standby* (alimentação trifásica);
c) Medição do consumo da iluminação e do sistema de tele-emergência (alimentação monofásica), com recurso a um analisador de potência adequado.

Para permitir a detecção dos picos momentâneos, foram registadas 3 medições por segundo, monitorizando-se uma viagem completa ao longo de todo o curso do ascensor, incluindo a abertura e fecho da porta de cabina (quando existente).

Os dados recolhidos foram depois descarregados através do *interface* próprio, da memória do analisador de potência para o computador, numa folha de cálculo especificamente concebida para a análise dos dados.


Certificado Energético para Ascensores segundo a norma VDI 4707 (Versão 03-2009)

SCHMITT+SOHN ELEVADORES

Número Ascensor:	VN106072
Tipo de Ascensor:	Sem casa de máquinas, suspensão central
Descrição:	Edifício Douro
Local de Instalação:	Rua da Boavista, 232
Cód. Postal	4150-322 Porto
Carga Nominal:	630 kg
Velocidade:	1,0 m/s
Curso:	15,00 m
Dias utilização:	365
Nº Pisos	6
Factor de carga:	0,7
Valores medidos:	
Potência em *stand-by*	54,00 W
Necessidade energética par uma manobra de referência seg. VDI 4707:	36,50 Wh
Necessidade Energética de *Stand-by* (VDI 4707):	≤ 100 W (Classe B) 414 kWh
Necessidade Energética de Manobra (VDI 4707):	≤ 1,89 mWh/(m•kg) (Classe D) 3357 kWh
Categoria de Utilização (VDI 4707)	4
Intensidade de Utilização:	elevada - elevada
Tempo médio de Manobra (horas por dia):	3 (> 2 ... 4,5)
Tempo médio de *stand-by* (horas por dia):	21

Classe de Eficiência Energética (VDI 4707): A B C D E F G — C

Necessidades energéticas anuais nominais de circuitos indep 3771 kWh
365 Dias de operação por ano

Só é possível comparar classes energéticas dentro da mesma categoria de utilização!

Tipo de Edifício e de utilização típica: Edifício de habitação com mais de 50 apartamentos; Edifício de e em altura com mais de 10 pisos; Grande Hotel; Hospital de peque média dimensão; Ascensor de carga integrado no processo produ um turno

Certificado elaborado em 28-06-2009 (Data) por _____ (Nome) _____ (Assinatura e carimbo da empresa)

Figura 3.3 - Simulador: Output de dados – Certificação Energética

A **figura 3.3** é um exemplo de um gráfico de medição obtido a partir dos dados recolhidos pelo analisador de potência, apresentando as medições típicas de uma manobra do ascensor elétrico de roda de aderência, a subir e a descer com a cabina em vazio.

Para a determinação do consumo anual de energia a partir dos dados obtidos, foi desenvolvido um modelo com base na norma alemã VDI 4707:2009, publicada em Março de 2009 pela Associação dos Engenheiros Alemães (Verein Deutscher Ingenieure). Foi assim possível realizar uma avaliação e classificação universal e transparente da eficiência energética de ascensores, com base em critérios standardizados.

As necessidades energéticas esperadas para operação do ascensor podem ser projectadas calculando as necessidades energéticas por ano usando os valores de necessidade energética de *standby* e de manobra, de acordo com a parcela temporal na categoria de utilização do ascensor, as necessidades energéticas por dia e os dias de operação por ano.

Com base nesta amostra de ascensores sujeitos a medições foi possível obter as seguintes conclusões:

1. O consumo do ascensor em *standby* (estado em que se encontra o ascensor quando não está em movimento, ascendente ou descendente), pode variar entre 12% e 65% do consumo total anual de energia do mesmo ascensor, em função da categoria de utilização do mesmo.

2. Quanto menor for a categoria de utilização, mais relevante se torna o consumo energético de um ascensor em *standby* ao longo de um ano, pelo que o investimento a realizar na melhoria da eficiência energética se deve concentrar em todas as medidas que possam reduzir o consumo em *standby*. Assim, para a categoria de utilização 1 (intensidade de utilização muito baixa e frequência de utilização muito baixa) a que corresponde, por exemplo, um edifício de habitação (que representará a situação com o maior número de ascensores instalados em Portugal), o consumo anual de energia em *standby* representa 65% do consumo energético total do ascensor. Por outro lado, quanto maior for a intensidade de utilização e a frequência de utilização, maior é o consumo energético durante a manobra. Na categoria de utilização 5 (correspondente a um grande hospital ou um grande edifício de escritórios) valerá a pena concentrar os esforços de investimento em melhorias no desempenho energético das máquinas de tracção e em sistemas de reinjecção de energia: o consumo em *standby* representa "apenas" cerca de 12% do consumo total.

Do estudo realizado, pode-se concluir ainda que é muito difícil, se não impossível, atingir a classe de eficiência energética "A", em ascensores com categorias de utilização de 1 a 3. Para categorias mais elevadas só se conseguirá atingir a classe de eficiência energética "A", recorrendo a um sistema de reinjecção de energia.

Para além da avaliação da otimização energética deverá ser realizada também a avaliação económica correspondente. Para a grande maioria das situações estudadas o investimento só se amortiza passados mais de 5 anos, pelo que a realização desse investimento fará sentido quando se pretender modernizar o equipamento (por fadiga dos materiais, por exemplo) ou como forma de aumentar o conforto, a segurança e diminuir o ruído e o desgaste do ascensor, ou por alguma imposição legal.

3.3 - Identificação de hipóteses de otimização

Por forma a sistematizar as hipóteses de optimização energética de um ascensor, optou-se por subdividir a análise em duas partes: uma analisando a optimização que poderá ser implementada em ascensores existentes e uma segunda abordando os novos ascensores a serem instalados de raiz.

3.3.1. Nos ascensores já existentes

Ascensores em standby:

Diz-se no preâmbulo da Directiva Comunitária EuP que *"como princípio geral, o consumo de energia dos produtos que consomem energia em estado de vigília ou desactivados deverá ser reduzido ao mínimo necessário para o seu funcionamento normal."* O consumo em *standby* é provocado por vários sistemas do ascensor:

1- **O Comando do Ascensor:** mesmo com a máquina imobilizada, o autómato do ascensor está sempre ativo para poder reagir de imediato a um qualquer comando do exterior. Paralelamente estará a controlar continuamente todas as seguranças do ascensor. O(s) transformador(es) normalmente utilizados têm perdas, apesar de não haver qualquer solicitação directa.

   Solução: Após a análise do padrão de tráfego do ascensor, desligar durante as "horas mortas", algumas das funções do comando, introduzindo um modo *sleep*. Desta forma, será possível por exemplo seletivamente desligar alguns pisos do edifício – solução aplicável por exemplo num edifício de escritórios, que funciona em pleno apenas entre as 08:00 horas e as 20:00 horas. Poder-se-á desligar também algumas das funções de controlo e supervisão do comando. Ter-se-á, contudo, de admitir um tempo de reação maior, quando durante o modo *sleep* ocorrer algum comando externo. Quanto aos transformadores, prevê-se a instalação de fontes de alimentação mais eficientes, por exemplo através da aplicação de componentes de eletrónica de potência. Ambas as soluções estão já contempladas na última geração de comandos eletrónicos, modelo Schmitt+Sohn Microtronic MC10.

2 - **Os Displays nos patamares:** os sinalizadores, com indicação do piso em que se encontra momentaneamente o ascensor, bem como as setas de sinalização estão continuamente com as lâmpadas ou com os segmentos ligados.

Solução: Recurso a LEDs para os *displays* nos patamares e dentro da cabina, eliminando dessa forma as pequenas lâmpadas incandescentes. Todos os ascensores produzidos actualmente pela Schmitt-Elevadores possuem já esta solução.

3 - **Painel de botoneira de cabina:** situação idêntica à dos *displays* nos patamares, porquanto dentro da cabina também existem sinalizadores com indicação do piso em que a cabina se encontra no momento.

Solução: Recurso a LEDs para os *displays* nos patamares e dentro da cabina, eliminando dessa forma as pequenas lâmpadas incandescentes. Todos os ascensores produzidos actualmente pela Schmitt-Elevadores possuem já esta solução.

4 - **Variador de frequência**: quando o ascensor é dotado de um sistema de variação de frequência, o variador estará sempre ativo, mesmo quando o ascensor não se encontra em movimento.

Solução: Após uma análise do padrão de tráfego do ascensor, temporizar um período da noite em que o variador de frequência é colocado em modo *sleep*. Num prédio de habitação, este período será tipicamente entre a 01:00 horas e as 06:00 horas da manhã. O variador ficará durante esse perído em modo *"sleep"*, sendo reativado quando ocorrer um comando externo. O tempo de reação do ascensor, perante um comando externo será maior do que em modo contínuo de utilização. Consegue-se obter uma poupança de até 50% no consumo energético provocado pelo variador de frequência. Este sistema já se encontra implantado nos novos sistemas de elevação da Schmitt-Elevadores, Lda.

5 - **Cortina fotoeléctrica** ou **célula fotoeléctrica**: sistema de protecção dos utentes, instalado na porta de cabina do ascensor.

Solução: Desligar o sistema de cortina fotoeléctrica ou cortina fotoeléctrica quando a porta de cabina se encontra fechada.

6 - **Luz de cabina**: em muitos ascensores, principalmente em ascensores sem porta de cabina, a luz de cabina encontra-se permanentemente acesa, mesmo quando o ascensor não se encontra em movimento.

Solução 1: Eliminar a iluminação permanentemente acesa na cabina. Através de um temporizador, desligar a iluminação 3 minutos após a última manobra realizada.

Solução 2: Recurso a LEDs para iluminação da cabina, substituindo as lâmpadas fluorescentes, incandescentes ou de halogéneo exis- tentes. Estas lâmpadas LED têm o mesmo formato das lâmpadas de halogéneo ou das lâmpadas fluoresventes (LEDs em forma tubolar).

7 - **Motor da porta de cabina**: está constantemente em carga, para garantir que a porta de cabina se mantém fechada.

Solução: A porta de patamar manter-se-á fechada, mesmo que a porta de cabina não esteja em carga. Logo, poder-se-á desligar o motor da porta de cabina 2 minutos após a última manobra realizada. Desta forma o motor da porta de cabina deixa de estar permanentemente em carga e a consumir energia.

8 - **Sistema de excesso de carga**: sistema electrónico que controla a carga máxima que pode entrar na cabina, estando continuamente ligado.

Solução: Desligar o sistema de excesso de carga 3 minutos após a última manobra;

9 - **Extractor instalado no tecto da cabina:** quando o ascensor for dotado de um extractor, este poderá estar continuamente ligado.

Solução: temporizer o extractor, isto é, ele só deverá ser activado quando a cabina iniciar uma manobra e deverá desligar-se 30 segundos após a última manobra.

10 - **Sistema de comunicação bi-direccional**: desde 1998, com a introdução da Directiva Ascensores, é obrigatória a instalação de um sistema de comunicação bi-direccional entre a cabina do ascensor e uma central de atendimento permanente, 24 horas por dia, 365 dias por ano, para todos os ascensores instalados a partir dessa data.

Solução: dado se tratar de um sistema de segurança, recomenda-se que o sistema não seja desligado ou colocado em modo *sleep*. A poupança energética poderá ser obtida através da aplicação de sistemas com fontes de alimentação mais eficientes, o que já está a ocorrer nos novos sistemas da Schmitt-Elevadores, Lda".

Capítulo 4

Eficiência energética em elevadores e escadas rolantes na União Europeia – Projeto E4

4.1 - Introdução

Citando o Professor Traça de Almeida da Universidade de Coimbra no artigo publicado na revista "Elevare n.º 1", "Atualmente existem cerca de 4,8 milhões de elevadores, bem como cerca de 75 mil escadas e tapetes rolantes instalados por toda a Uniao Europeia dos 27. Todos os anos, 115 mil novos elevadores e 3,5 mil escadas rolantes sao colocados em funcionamento.Tendo em conta as tendências demograficas, bem como uma necessidade crescente por conveniencia, e esperado que o numero de elevadores e escadas rolantes instalados mundialmente aumente, tal como na Europa. O consumo energético dos elevadores estima-se atualmente em 3 a 5% do consumo global de um edifício. Cerca de um terco do consumo final de energia na Comunidade e utilizado no setor terciario e residencial, sobretudoem edificios. Devido a crescente exigenciade conforto, o consumo de energia em edificiosregistou recentemente um aumentosignificativo, sendo este um dos principaismotivos que levaram a uma maior quantidadede emissões de CO2. Existem, neste setor, elevados potenciais de poupança inexplorados em equipamentos energicamenteeficientes, decisões de investimento e abordagens comportamentais.

O Projeto E4 teve como objetivo melhorar o desempenho energético dos elevadores e escadas rolantes, nos edifícios do setor terciário e nos edifícios residenciais multi-familiares. O nosso objetivo é de apresentarmos os principais resultados do projeto.

4.2 - Mercado europeu de elevadores e escadas rolantes

Como parte do Projeto E4 foi realizado, um inquérito com a colaboração dos membros de associações nacionais de elevadores e escadas rolantes da Associação Europeia de Elevadores (ELA) de 19 paises europeus–Alemanha, Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Luxemburgo, Holanda, Polónia, Portugal, Espanha, Suécia, Reino Unido, Noruega e Suíça. O objetivo deste inquérito foi a caraterização dos equipamentos instalados, de acordo com as suas caraterísticas tecnológicas básicas e o tipo de edifício onde estão instalados.

De acordo com os resultados do inquérito existem cerca de 4,5 milhões de elevadores instalados nos 19 países pesquisados. A **figura 4.1** mostra a distribuição, por setor, dos elevadores instalados em cada um dos países estudados. Nos países estudados, os elevadores residenciais representam, de longe, o maior grupo com cerca de 2,9 milhões de elevadores em utilização.

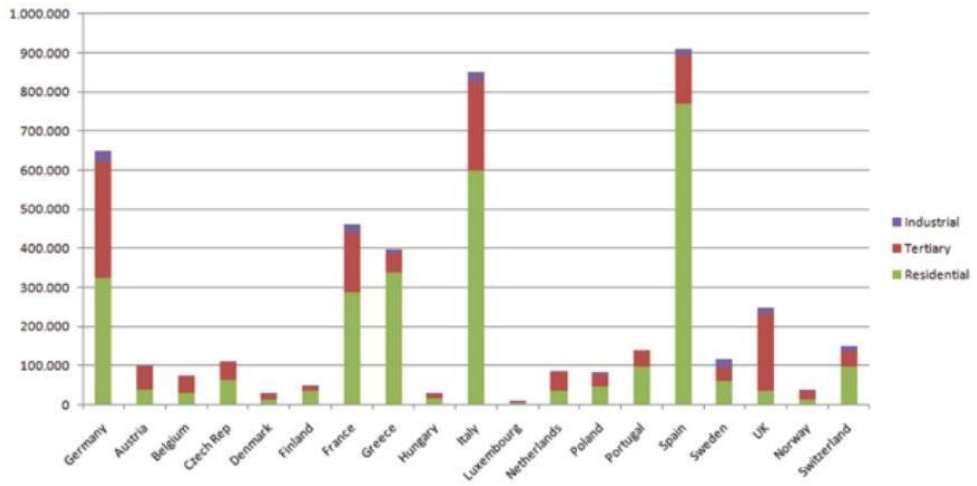


Figura 4.1- Distribuição de elevadores por setor de atividade

Segue-se o setor terciário com cerca de 1,4 milhões de elevadores instalados e no setor industrial existem apenas 180 mil elevadores.

4.2.1 - Consumo de energia em elevadores e escadas rolantes

Uma campanha de monitorização foi realizada no ambito do Projeto E4 como contributo para melhorar a compreensão do consumo de energia e eficiência energética de elevadores e escalas rolantes na Europa. Os objetivos desta campanha foram a ampliação da base empirica do consumo de energia de elevadores e escadas rolantes, fornecer dados de monitorização disponíveis publicamente e encontrar caminhos para configurações de sistemas de elevada eficiência. O número inicial de instalações a serem monitorizadas no ambito deste Projeto era de 50 mas, no final, 74 elevadores e 7 escadas rolantes, isto é, um total de 81 instalações, foram analisadas nos quatro paises em estudo: Alemanha, Itália, Polónia e Portugal.

Foi feito um esforço para selecionar elevadores com diferentes idades e utilizando diferentes tecnologias de forma a permitir a comparação da *performance* de uma vasta gama de elevadores com diferentes caraterísticas. A **figura 4.2** mostra a segmentação das unidades monitorizadas pelo tipo de tecnologia utilizada. Foi utilizada uma metodologia comum a todos os parceiros para garantir a repetibilidade das medições.

Esta metodologia descreve a medição da energia elétrica consumida durante um período de utilização normal de elevadores, escadas e tapetes rolantes. Em particular é feita a distinção entre o consumo em funcionamento e em *standby* nos equipamentos analisados.

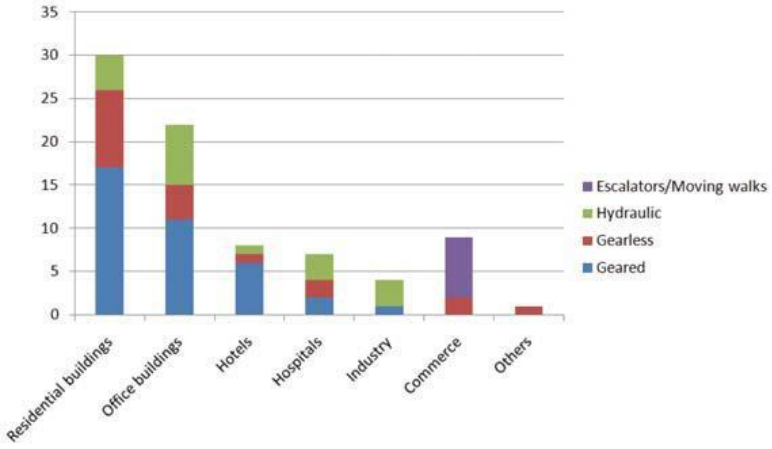


Figura 4.2 – Instalações monitorizadas por um tipo de tecnologia

O consumo total de energia para um ciclo completo e influenciado por numerosos fatores internos, como o consumo do sistema de controlo, o conversor de frequência, equipamento auxiliar, aceleração e desaceleração para nomear apenas alguns, mas também varia com a carga e especialmente com o comprimento do curso do elevador, tornando díficil a comparação direta dos valores de consumo de um ciclo durante a fase de funcionamento. Por esta razão, uma abordagem normalizada, utilizando o consumo específico em viagem em mWh/(kg*m), pode facilitar a comparação.

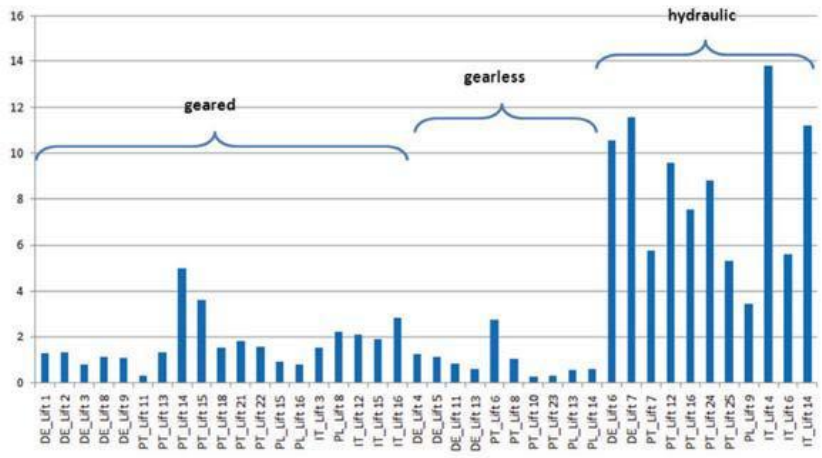


Figura 4.3 - Consumo especifico de energia, em viagem, em elevadores monitorizados no setor terciário [mWh/kg.m]

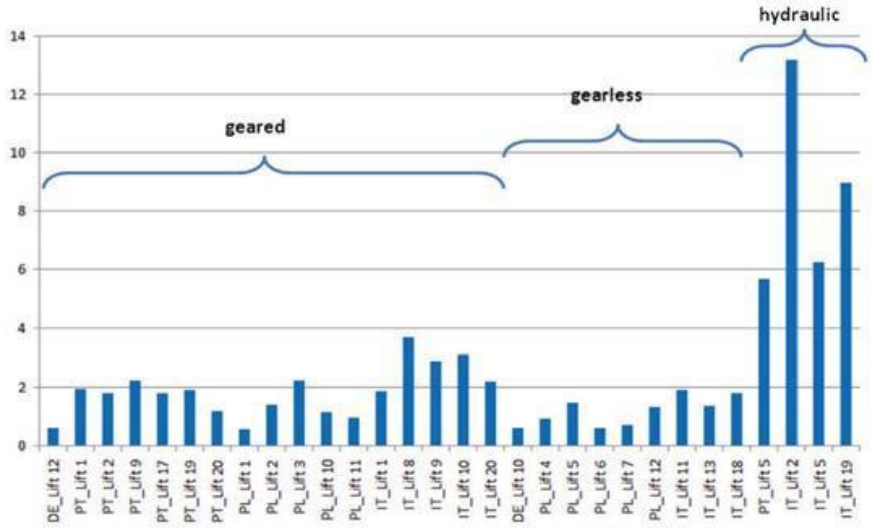


Figura 4.4 - Consumo especifico de energia, em viagem, em elevadores monitorizados no setor residencial [mWh/kg.m]

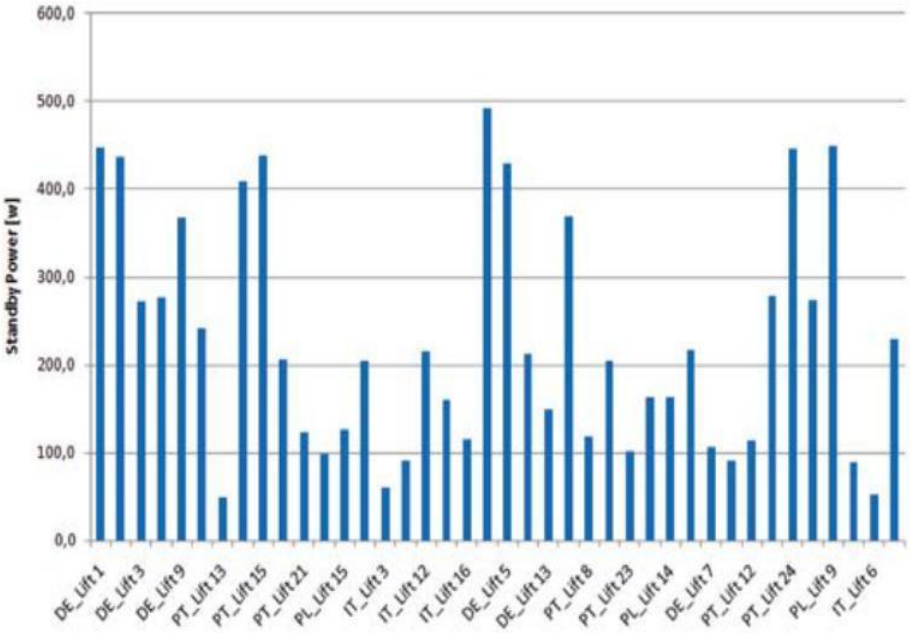


Figura 4.5 - Medição da energia em elevadores,modo *standby*, no setor terciário

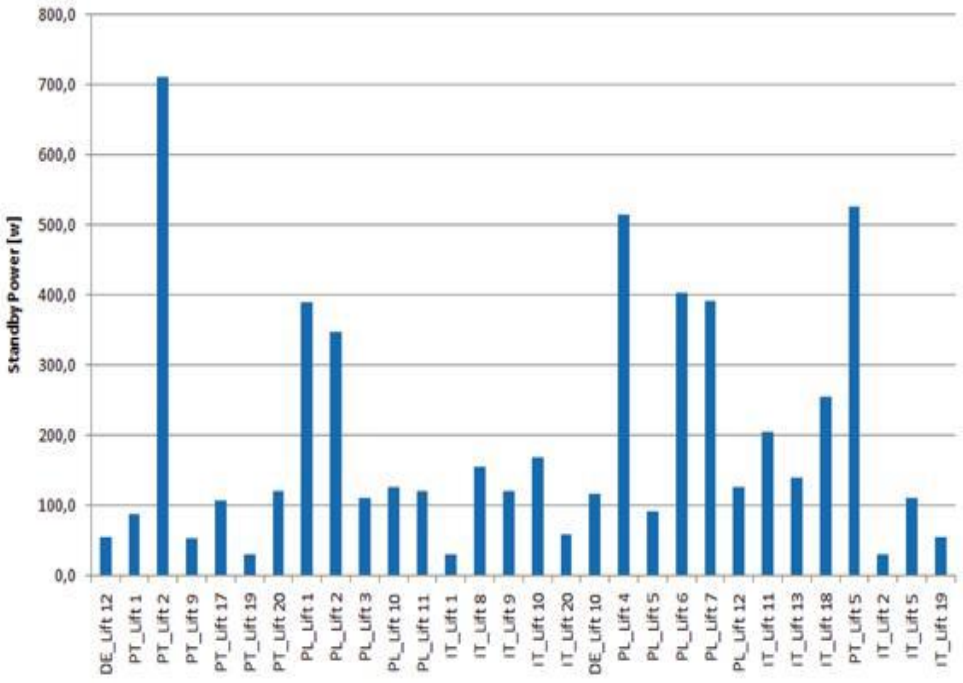


Figura 4.6 - Medição da energia em elevadores, modo *standby*, no setor residencial

Os valores medidos da potência em *standby* tambem apresentam uma grande variacao. Este consumo em *standby* deriva dos sistemas de controlo, iluminação, *displays* e consolas operacionais, em cada piso e dentro da cabine do elevador, utilizados. Nos elevadores analisados, a gama de potências varia entre 15 W e 710 W.

A importancia relativa do consumo em *standby* varia entre 5% a 95%. Esta diferença surge sobretudo pela existência de diferentes perfis de utilizacao (quanto maior o numero de viagens, maior a importância relativa deste tipo de consumo), mas tambem pela diferenca nos valores medidos de consumo em viagem e em *standby*. Combinando os resultados do inquerito de mercado e da campanha de monitorizacao, foi feita uma estimativa da energia utilizada nos elevadores europeus.

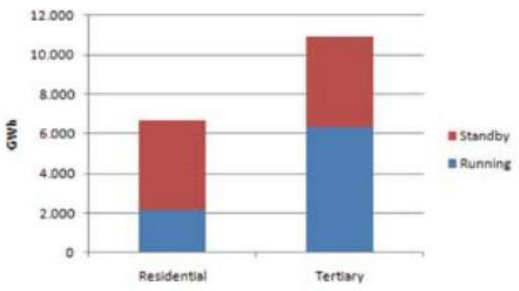


Figura 4.7 - Consumo anual de energia elétrica nos elevadores, UE-27

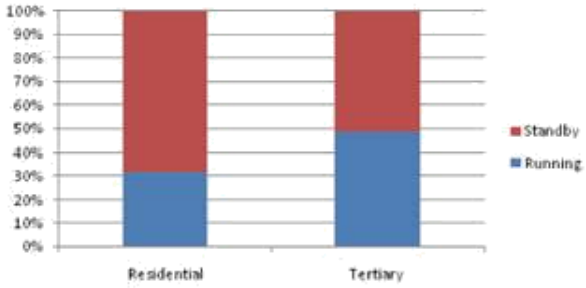


Figura 4.8 - Proporção do modo *standby* e modo de funcionamento no consumo global de energia dos elevadores

A **figura 4.8** mostra uma estimativa do consumo de energia dos elevadores europeus em funcionamento e em *standby*, no setor residencial e terciário.

Embora haja um numero menor de elevadores instalados no setor terciário, os seus consumos de energia são muito maiores do que no setor residencial, devido a sua utilização mais intensa. A energia elétrica total consumida pelos elevadores estima-se em 18,4 TWh, dos quais 6,7 TWh no setor residencial, 10,9 TWh no setor terciário e apenas 810 GWh no setor industrial. Como pode ser visto, o consumo de energia elétrica em *standby* representa uma parte importante do consumo total de eletricidade, sobretudo em elevadores instalados no setor residencial onde o tempo gasto nomodo *standby* é maior.

4.3 – Estimativas das poupanças energéticas

A estimativa de poupanças energéticas em elevadores e feita de acordo com uma metolodogia previamente descrita, pode assumir dois cenários:

1. São utilizadas as Melhores Tecnologias Disponíveis (Best Available Technologies-BAT).

2. São utilizadas as Melhores Tecnologias Ainda Não Disponíveis (Best Not yet Available Technologies - BNAT).

As Melhores Tecnologias Disponíveis são atualmente os melhores componentes a serem comercializados e as Melhores Tecnologias Não Disponiveis são tecnologias em estado-de-arte que tem sido recentemente desenvolvidas mas que ainda não se encontram disponíveis para comercialização. No que diz respeito aos valores alcançados de potencial de poupanca, é importante referir que:

– O custo inicial das tecnologias utilizadas, sendo uma questao importante relativamente a esta aplicação não foi considerado, não se podendo, por isso, retirar conclusões quanto à relação custo-eficácia da utilização destas tecnologias;

– Os sobrecustos de manutenção, como a mão-de-obra e a substituição de peças, não foram incluídas nos cálculos;

– Algumas tecnologias podem aumentar o consumo em *standby* enquanto reduzem o consumo durante a fase de funcionamento. Portanto, a sua aplicação deve ser cuidadosamente avaliada, caso a caso.

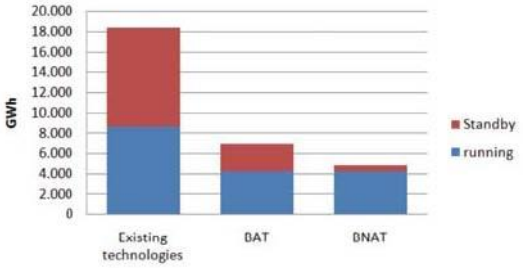


Figura 4.9 – Estimativa do consumo de energia nos elevadores

A **figura 4.9** mostra a estimativa do consumo de energia nos elevadores, de acordo com os diferentes cenários propostos.

Os resultados mostram que é possível uma poupança global de mais de 65%. A redução de 10 TWh consegue-se utilizando as Melhores Tecnologias Disponiveis e de 12 TWh quando as tecnologias que estão a ser desenvolvidas são utilizadas, o que se traduz numa redução de cerca de 4,4 milhões de toneladas de CO2eq. e 5,2 milhões de toneladas de CO2eq., respetivamente, com os métodos atuais de produção de eletricidade.

A poupança no consumo de energia em *standby* é particularmente notável, mesmo no cenário BAT onde, embora sejam utilizados equipamentos de baixa potência estes estão sempre ligados, mesmo quando nao estão a ser utilizados, o que é atualmente uma prática comum. A redução da potência em *standby* de mais de 80% é considerada viável com tecnologias "off-the-shelf". Em particular, a utilização de iluminação LED pode desempenhar um papel crucial nesta redução.

4.4 – Conclusões

O potencial de redução da energia consumida no modo *standby* é uma oportunidade para a eficiência energética que não pode ser ignorada: a necessidade energética no modo *standby* pode ser reduzida em mais do que 70% se for utilizada a melhor tecnologia disponível. No entanto, a percentagem do modo *standby* nos elevadores representa 5 a 95% do consumo total, o que é um intervalo bastante alargado.

Este amplo intervalo resulta, por um lado, do padrão de utilização – quanto maior o número de viagens, maior a importância relativa deste tipo de consumo e, por outro lado, o consumo de energia durante o modo de funcionamento e o modo de *standby* é determinado pela tecnologia utilizada e pela sua eficiencia energética. Os resultados da estimativa de poupanças mostram que é possível uma poupança global de mais do que 65%.

A redução de 10 TWh é garantida pela BAT e de 12 TWh na BNAT, o que se traduz numa redução de cerca de 4,4 milhões de toneladas de CO2eq e 5,2 milhões de toneladas de CO2eq, respetivamente, uma estimativa com base nos métodos atuais de produção de energia elétrica".

Capítulo 5

O efeito regenerativo

Citando o Eng.º Maurício Dias Professor do ISEP "A regeneração é uma das tecnologias mais recentes para contrariar o crescente aumento dos preços da energia eléctrica. Esta permite a reutilização da energia resultante da inércia proveniente da frenagem do elevador, escadas e tapetes rolantes colocando-a na rede elétrica do edifício.

Dado que estes equipamentos consomem grande percentagem de energia principlamente devido à potência dos motores, face aos restantes consumos de um edifício. Com a utilização dos variadores/conversores de frequência, veio-se a conseguir uma redução de certo modo significativa nos consumos. Por outro lado era do conhecimento dos fabricantes que existia uma percentagem de energia dissipada, por efeito de joule, pelas resistências de frenagem dos variadores. Assim, uma das formas de aproveitamento dessa energia era interligar os barramentos dos variadores/conversores, de maneira que quando um elevador estivesse a frenar o outro estaria a aproveitar a sua energia. Mas isto só faz sentido quando temos dois elevadores em caixa dupla. Com um só elevador esta troca de energia não se torna possível.

Sendo uma solução barata torna-se pouco eficiente, porque seria necessário que os dois elevadores funcionassem em oposição, ou seja, enquanto um deles estivesse a frenar estaria o segundo a receber a energia transferida pelo primeiro. A outra condição é que todos os variadores têm de ter a mesma potência e esta situação nem sempre acontece.

Com o aparecimento dos variadores regeneradores, ou seja, unidades que tem a função de controlar o motor e aproveitar a energia que este produz quando está a frenar, colocando-a na rede elétrica, a questão acima descrita fica solucionada, mas o enorme custo por unidade é desencorajador o que levou a Pinto & Cruz a procurar outra solução.

Essa solução apareceu mais recentemente sobre a forma de uma unidade regeneradora universal, que é composta por um inversor e uma reatância que para além da função de filtro faz a leitura da sequência de fases, o que permite a ligação em paralelo com a rede sem o menor problema para esta.

Apesar de ser uma solução versátil, continua a ser uma solução extremamente dispendiosa quando colocada unitariamente por elevador. A solução encontrada pela Pinto & Cruz para contornar esta situação foi pegar numa unidade regeneradora e ligar essa unidade a vários variadores de frequência com a vantagem de podermos no mesmo grupo de elevadores interligar vários equipamentos de potências diferentes e, até mesmo, de marcas diferentes.

5.2 - Como funciona a regeneração em grupo

Todos os quadros de comando de elevadores, escadas e tapetes rolantes equipados com variadores de frequência têm incorporado resistências de frenagem cuja função é dissipar a energia produzida pelo motor da máquina de tração durante o seu funcionamento nos momentos de frenagem e que, nesse instante, está a ser devolvida ao variador de frequência. Como este não tem a capacidade de a devolver à rede, o que aumentaria substancialmente a energia no barramento com todos os inconvenientes que daí advem, o variador envia automaticamente essa energia excedente para as resistências de frenagem que a dissipa em forma de calor.

Com a presença de uma única unidade regeneradora, temos a possibilidade de a ligarmos em grupo entre vários variadores/conversores de frequências dos distintos elevadores, que automaticamente monitoriza a existência de excedente de energia derivado das suas manobras e que seriam dissipadas pelas resistências de frenagem e reenviam essa energia para a rede elétrica do edifício perfeitamente limpa.

A primeira instalacao deste equipamentocom o conceito acima descrito foi executada pela Pinto & Cruz no Hospital Sra. da Oliveira em Guimaraes, no qual utilizamos ossete elevadores existentes com potencias de 11 kW cada e interligamos em paralelotodos os variadores de frequencia a um regeneradorde 45 kW.

A ligação do Regenador pode ser feita de duas formas:

Através da saída da resistência de frenagem, controlada pelo variador, e a outra através da ligação do barramento diretamente, sendo aí o regenerador o principal elemento no controlo da energia existente no barramento, neste caso dos sete variadores presentes. A configuração utilizada no Hospital Senhora da Oliveira em Guimarães foi a segunda,uma vez que esta nos permite manter as resistências de frenagem presentes e em caso de um possivel bloqueio da unidade regeneradora os elevadores continuam a funcionar normalmente e sem qualquer problema. Apesar das resistências estarem presentes, estas nunca irão dissipar a energia em excesso, salvo em caso de anomalia da unidade regeneradora, porque esta está programada para enviar para a rede um nível inferior aquele a que o conversor está programado para enviar para a resistência de frenagem. Nesta instalação foram utilizados um conjunto de 7 (sete) ascensores equipados de origem com máquina assíncrona com redutora,dos quais apenas 2 (dois) já estavam equipados com comandos com controlo por variação de frequência, sendo os restantes de duas velocidades. Foi colocado um contador energético à entrada da instalação antes de se proceder à remodelação e monitorizado num período de tempo definido.Após a instalação de variadores de frequência nos restantes cinco elevadores, procedeu-se novamente à monitorização da contagem energética no mesmo intervalo de tempo e constatou-se uma redução do consumo de energia em -30% no seu conjunto. Após a instalação do regenerador,foi novamente monitorizada a instalação no mesmo intervalo de tempo e verificou-se que a energia

devolvida à rede era cerca de 17% que adicionado a redução de consumo de energia pela instalação dos conversores de frequência concluiu-se que por cada ano de consumo energético do grupo dos sete elevadores, o equivalente a 2 (dois) meses são devolvidos à rede e dado que se trata de um unidade de saúde cujo tráfego é relativamente elevado o retorno do investimento será inferir a 5 (cinco) anos.

Em conclusão, a instalação de sistemas de regeneração de energia em elevadores,escadas e tapetes rolantes, além de mais ecológicos são economicamente vantajosos essencialmente em edifícios de médio e alto tráfego tais como hóteis, hospitais, edifícios de serviços, centros comerciais, aeroportos e similares. Esta condição é fundamental para o aproveitamento energético, dado que a energia que retorna se não for utilizada pelos equipamentos de elevação e utilizada por outros equipamentos que naquele momento estejam ligados na coluna de alimentação do edifício. Cada vez mais se verifica que existem entidades sensíveis às questões ecológicas, as poupanças energéticas e a rentabilidade dos equipamentos instalados, mostrando-se recetivas às novas soluções que o mercado vai oferecendo nesta área a que a Pinto & Cruz elevadores e instalações, tem-se mantido pioneira na oferta das mais diversas soluções inovadoras".

Capítulo 6

Número de elevadores a instalar

O número de elevadores a instalar num determinado edifício depende do fim a que se destina, pelo que temos de ter em linha de conta o número de pisos e o número de utilizadores. Assim, vamos catalogar os determinados tipos de edíficios:

- Edifícios residênciais;
- Edifícios de escritórios;
- Edifícios destinados a hóteis;
- Edifícios hospitalares;
- Edifícos "Centros Comerciais".

Fundamentalmente são estes edifícios que utilizam os elevadores que deverão ser em número suficiente de modo a poderem escoar em tempo útil e em segurança os seus utilizadores. Neste contexto, iremos também abordar o tipo de comandos e a velocidade que devem intrinsecamente fazer parte deste equipamento de transporte vertical.

6.2 – Tipos de comando

6.2.1 – Comando automático simples

Este comando é cartacterizado no essencial por botões de patamar e respectiva botoneira de cabina. Uma chamada feita em qualquer piso ou da botoneira da cabina levará o elevador a esse mesmo piso. Este tipo de comando regista qualquer chamada.

6.2.2 – Comando selectivo à descida e à subida

Este comando regista as chamadas na botoneira da cabina e nos botões de patamar e caracteriza-se por atender as chamadas tanto na descida como na subida. Aplica-se a um só elevador e é utilizado em edifícios de escritórios e hospitais onde o tráfego de pessoas é bastante intenso.

6.2.3 – Comando selectivo na descida

Caracterizado por efectuar o percurso desde o piso 0 até ao último piso, seleccionando as chamadas da cabina por ordem de chamada, e na descida atender as chamadas efectuadas nos respectivos pisos, sendo que existe um botão de chamada por patamar. Utilizado em edifícios de escritórios de grande utilização, hospitais, hóteis, etc.

6.2.4 – Comando duplo

Aplica-se a elevadores de caixa dupla, ou seja, de dois elevadores com dois botões por piso. O elevador mais próximo do patamar onde foi feita a chamada deslocar-se-á ao respectivo piso. Se os dois elevadores estiverem estacionados no piso 0, apenas um irá atender a chamada feita por um utilizador.

6.3 – Cálculo de tráfego nos elevadores

É a sistemática de cálculo que permite avaliar se a quantidade de elevadores e a área das Caixas previstas durante o desenvolvimento de um projeto serão satisfatórias para proporcionarem um transporte vertical adequado ao fluxo de pessoas do edifício. É indispensável para a fixação das especificações básicas dos elevadores e de seu número. Segundo a norma NBR-5665 "Cálculo de Tráfego nos Elevadores", da ABNT, estabelece as condições mínimas a serem observadas no tráfego das instalações de elevadores de passageiros. Para edifícios de médio e grande porte recomenda-se uma análise detalhada do projeto e orientações do fabricante que permitam alcançar a melhor performance de tráfego para o edifício.

Vários municípios exigem a apresentação do cálculo de tráfego que demonstre estarem os elevadores atendendo aos preceitos mínimos exigidos pela ABNT, para que seja aprovado o projeto do edifício.

Posteriormente, para a expedição dos alvarás de instalação e funcionamento dos elevadores, esses municípios exigem que o cálculo de tráfego seja novamente apresentado, desta feita pela empresa fabricante dos equipamentos.

Mesmo nos municípios onde a norma NBR-5665 não seja exigida para aprovação de projeto, recomenda-se que seja feito o cálculo de tráfego, pois, o mesmo é instrumento de grande valia na fixação da solução mais adequada e mais econômica para os elevadores.

Para que se possa efetuar o cálculo, as seguintes variáveis deverão ser conhecidas:

- População do prédio
- Número de paragens dos elevadores
- Percurso dos elevadores
- Tipos de portas dos elevadores
- Capacidade das cabinas
- Velocidade dos elevadores
- Quantidade de elevadores

6.3.1- Apresentação do cálculo

O caminho básico para a elaboração do cálculo de tráfego, com a descrição de todas as etapas necessárias, e com as exigências da NBR-5665, segue o modelo do exemplo de cálculo que apresentamos no final deste capítulo.

Devemos ter em consideração que o cálculo deve ser executado separadamente para elevadores situados em halls distintos e também a populações distintas.

6.3.2 - População

6.3.2.1 – Cálculo da população de um edifício

A população de um edifício é calculada com base nas seguintes relações (conforme item 5.1 da NBR-5665):

a) escritórios de uma única entidade 1 pessoa por 7,00m² de sala.
b) escritórios em geral e consultórios 1 pessoa por 7,00m² de sala.
c) apartamentos 2 pessoas por 1 dormitório;
4 pessoas por 2 dormitórios;
5 pessoas por 3 dormitórios;
6 pessoas por 4 dormitórios ou mais; e
1 pessoa por dormitório de serviçal.
d) hotéis 2 pessoas por dormitório.
e) hospitas 2,5 pessoas por leito.
f) restaurantes 1 pessoa p/1,50m² de salão de refeições.
g) escolas
salas de aula 1 pessoa por 2,00m².
salas de administração 1 pessoa por 7,00m².
h) edifícios-garagem com rampas sem manobrador 1,4 pessoas por vaga.

i) lojas e centros comerciais 1 pessoa por 4,00m² de loja.

Em qualquer tipo de edifício podem ser considerados apenas 50% da população do pavimento imediatamente acima e/ou imediatamente abaixo do piso de acesso, desde que estes estejam situados a uma distância máxima de 5m em relação ao piso de acesso.

Para efeito do cálculo de tráfego não será considerada a população do piso de acesso, como também não serão consideradas as áreas destinadas a circulação, halls, sanitários, elevadores, etc. No Modelo de Cálculo, indica-se a área útil calculada, ou número de dormitórios, etc. de acordo com o tipo de uso do edifício.

6.3.3 – Relação entre o tipo de edifício e o número de pessoas/m²

Indica-se a relação apresentada para o tipo de edifício em questão.

6.3.3.1 - População total

Para aplicarmos o modelo de cálculo apresentado como exemplo, calcula-se a população total do edifício.

6.3.3.2 - Mínimo a ser transportado em 5 minutos

O elevador ou conjunto de elevadores devem ser capazes de transportar, em 5 minutos, no mínimo, as seguintes percentagens da população de um edifício (conforme item 5.2 da NBR-5665):

a) escritórios de uma única entidade 15%
b) escritórios em geral e consultórios 12%
c) apartamentos 10%
d) hotéis 10%
e) restaurantes 6%
f) hospitais:

- quando houver tubos de queda para roupa e lixo e monta-carga ..... 8% para o serviço de nutrição;
- quando não houver essas condições 12%

g) escolas 20%
h) edifícios-garagem com rampa sem ascensorista 10%
i) lojas e centros comerciais 10%

Num edifício de uso misto deve ser adotada para cada uma das partes a percentagem correspondente ao seu uso, entre as indicadas acima.

A fixação dessas percentagens da população a serem transportadas em 5 minutos foi baseada em dados experimentais.

Ao longo do dia, o fluxo de procura dos elevadores pelos seus utilizadores apresenta períodos de pico, sendo o maior deles na hora da chegada.

Por exemplo, na hora de ponta a população distribui-se (no tempo) conforme mostra a figura 16, sendo que no período crítico de 5 minutos que antecede o horário de início do expediente, a percentagem da população que procura os elevadores é de 12%, em média.

Embora a norma indique, para escritórios de uma única entidade, a percentagem de 15% como mínima, recomendamos, baseados na nossa experiência, a percentagem mínima seja de 18%.

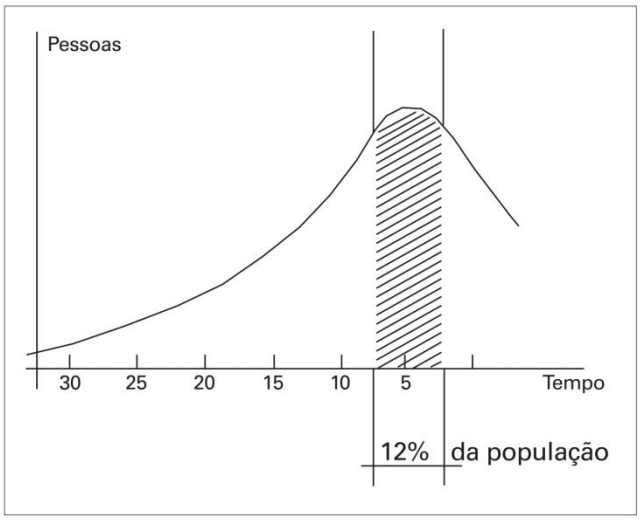


Figura 6.1- Distribuição da população no tempo

6.3.4 - Intervalo de tráfego máximo admissível

O intervalo de tráfego máximo admissível, ou seja, o tempo máximo que um passageiro deve esperar pelo elevador, é dado na **tabela 6.1**, em função da finalidade do prédio. Para edifícios de apartamentos não existe a exigência de intervalo de tráfego máximo admissível (conforme item 6.5 da NBR-5665).

Intervalo de Tráfego		
Número de elevadores	Finalidade do prédio	Intervalo de tráfego máximo (s)
1	Geral (exceto apartamentos)	80
2	Geral (exceto apartamentos)	60
3	Geral (exceto apartamentos)	50
4 ou mais	Escritórios de uma única entidade	40
	Escritórios em geral e consultórios	40
	Hospitais	45
	Hotéis	45
	Escolas	45
	Lojas	45
	Garagens	45
	Restaurantes	45

Tabela 6.1 – Intervalo de tráfego máximo admissível

6.4 - Elevadores

6.4.1 - Unidades do grupo

É a quantidade de elevadores prevista.

6.4.2 - Capacidade (passageiros)

É a lotação máxima da cabina, menos o ascensorista no caso de haver.

6.4.3 - Paragens

É a quantidade de pisos servidos pelo elevador, incluindo o térreo, subsolos, sobrelojas, mezanino, etc.

6.4.3.1- Paragens prováveis

O número de paragens prováveis que o elevador pode efetuar numa viagem é função da capacidade da cabina e da quantidade de pavimentos a serem atendidos. Este número é obtido com base no *Cálculo de Probabilidades*, através da fórmula (6.1).

$$N = P - (P - 1) \times \frac{(P - 2) \times C}{P - 1} \tag{6.1}$$

onde:

N = número de paragens prováveis

P = número de paragens do elevador

c = lotação da cabina, excluindo o ascensorista

A **tabela 6.2** e **6.2.1** mostra o "número de paragens prováveis" para algumas combinações de capacidade e número de pisos servidos.

	Capacidade da Cabina (excluído o ascensorista)										
	3	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
2	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
3	2,75	2,88	2,94	2,97	2,98	2,99	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
4	3,11	3,41	3,60	3,74	3,82	3,88	3,92	3,95	3,97	3,98	3,98
5	3,31	3,73	4,05	4,29	4,47	4,60	4,70	4,77	4,83	4,87	4,90
6	3,44	3,95	4,36	4,69	4,95	5,16	5,33	5,46	5,57	5,66	5,73
7	3,53	4,11	4,59	4,99	5,33	5,60	5,84	6,03	6,19	6,33	6,44
8	3,59	4,22	4,76	5,22	5,62	5,96	6,25	6,50	6,72	6,90	7,06
9	3,64	4,31	4,90	5,41	5,86	6,25	6,59	6,90	7,16	7,39	7,59
10	3,68	4,38	5,01	5,56	6,05	6,49	6,88	7,23	7,54	7,81	8,05
11	3,71	4,44	5,10	5,69	6,22	6,70	7,13	7,51	7,86	8,18	8,46
12	3,74	4,49	5,17	5,79	6,36	6,87	7,33	7,76	8,14	8,50	8,81
13	3,76	4,53	5,23	5,88	6,47	7,02	7,52	7,97	8,39	8,78	9,13
14	3,76	4,56	5,29	5,96	6,58	7,15	7,67	8,16	8,61	9,02	9,41
15	3,79	4,59	5,33	6,03	6,67	7,26	7,81	8,33	8,80	9,25	9,66
16	3,80	4,62	5,38	6,08	6,75	7,36	7,94	8,48	8,98	9,45	9,88
17	3,82	4,64	5,41	6,14	6,82	7,45	8,05	8,61	9,13	9,62	10,09
18	3,83	4,66	5,45	6,18	6,88	7,53	8,15	8,73	9,27	9,79	10,27
19	3,84	4,68	5,47	6,23	6,94	7,61	8,24	8,84	9,40	9,93	10,44
20	3,84	4,70	5,50	6,26	6,99	7,67	8,32	8,94	9,52	10,07	10,58
21	3,85	4,71	5,52	6,30	7,03	7,73	8,40	9,03	9,62	10,19	10,73
22	3,86	4,72	5,55	6,33	7,08	7,79	8,46	9,11	9,72	10,31	10,86
23	3,87	4,74	5,57	6,36	7,11	7,84	8,53	9,18	9,81	10,41	10,98
24	3,87	4,75	5,58	6,38	7,15	7,88	8,58	9,25	9,90	10,51	11,09
25	3,88	4,76	5,60	6,41	7,18	7,93	8,64	9,32	9,97	10,60	11,20
26	3,88	4,77	5,62	6,43	7,21	7,97	8,69	9,38	10,04	10,68	11,29
27	3,89	4,78	5,63	6,45	7,24	8,00	8,73	9,44	10,11	10,76	11,39
28	3,89	4,78	5,64	6,47	7,27	8,04	8,78	9,49	10,17	10,83	11,47
29	3,89	4,79	5,66	6,49	7,29	8,07	8,82	9,54	10,23	10,90	11,55
30	3,90	4,80	5,67	6,51	7,32	8,10	8,85	9,58	10,29	10,97	11,62

Tabela 6.2 – Número de paragens prováveis

Capacidade da Cabina (excluído o ascensorista)

	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
3	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
4	3,99	3,99	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
5	4,93	4,95	4,96	4,97	4,98	4,98	4,99	4,99	4,99	4,99	5,00
6	5,78	5,82	5,86	5,89	5,91	5,93	5,94	5,95	5,96	5,97	5,98
7	6,53	6,61	6,63	6,73	6,77	6,81	6,84	6,87	6,89	6,91	6,92
8	7,19	7,31	7,41	7,49	7,56	7,63	7,68	7,73	7,76	7,80	7,83
9	7,77	7,92	8,06	8,17	8,28	8,37	8,45	8,52	8,58	8,63	8,68
10	8,27	8,46	8,63	8,78	8,92	9,04	9,15	9,24	9,33	9,40	9,47
11	8,71	8,94	9,15	9,33	9,50	9,65	9,78	9,91	10,02	10,11	10,20
12	9,10	9,37	9,61	9,82	10,02	10,20	10,36	10,51	10,65	10,77	10,88
13	9,45	9,75	10,02	10,27	10,49	10,70	10,89	11,07	11,23	11,38	11,51
14	9,76	10,09	10,39	10,67	10,92	11,16	11,38	11,58	11,77	11,94	12,10
15	10,04	10,39	10,72	11,03	11,31	11,58	11,82	12,05	12,26	12,45	12,64
16	10,29	10,67	11,03	11,36	11,67	11,96	12,23	12,48	12,71	12,93	13,14
17	10,52	10,92	11,30	11,66	11,99	12,31	12,60	12,87	13,13	13,37	13,60
18	10,72	11,15	11,56	11,93	12,29	12,63	12,94	13,24	13,52	13,78	14,03
19	10,91	11,36	11,79	12,19	12,57	12,92	13,26	13,58	13,88	14,17	14,43
20	11,09	11,56	12,00	12,42	12,82	13,20	13,56	13,90	14,22	14,52	14,81
21	11,25	11,73	12,20	12,54	13,06	13,45	13,83	14,19	14,53	14,85	15,16
22	11,39	11,90	12,38	12,84	13,27	13,69	14,09	14,46	14,82	15,16	15,49
23	11,53	12,05	12,55	13,02	13,48	13,91	14,32	14,72	15,09	15,45	15,80
24	11,66	12,19	12,71	13,20	13,67	14,12	14,55	14,96	15,35	15,73	16,09
25	11,77	12,32	12,85	13,36	13,84	14,31	14,75	15,18	15,59	15,98	16,36
26	11,88	12,45	12,99	13,51	14,01	14,49	14,95	15,39	15,82	16,22	16,61
27	11,99	12,56	13,12	13,65	14,17	14,66	15,13	15,59	16,03	16,45	16,86
28	12,08	12,67	13,24	13,79	14,31	14,82	15,31	15,78	16,23	16,67	17,09
29	12,17	12,77	13,35	13,91	14,45	14,97	15,47	15,95	16,42	16,87	17,30
30	12,26	12,87	13,46	14,03	14,58	15,11	15,63	16,12	16,60	17,06	17,51

Tabela 6.2.1 – Número de paragens prováveis

6.4.3.2 - Percurso (m)

É a distância em metros percorrida pelo elevador desde o patamar do piso principal até ao patamar do último piso. Não inclui, portanto, o espaço livre superior e o Poço.

6.5 - Velocidade (m/s)

A velocidade é estabelecida, inicialmente, de forma compatível com a altura do prédio, conforme as **tabelas 6.2** e **6.2.1**.

Velocidades recomendadas para edifícios residenciais:

Percurso (m)	Velocidade (m/s)
até 29	de 0,75 a 1,00
de 30 a 44	de 1,00 a 1,50
de 45 a 59	de 1,25 a 2,00
de 60 a 74	de 1,75 a 2,50
de 75 a 90	de 2,50 a 3,50

Tabela 6.3 – Velocidades recomandadas

Velocidades recomendadas para edifícios não-residenciais:

Percurso (m)	Velocidade (m/s)
até 17	de 0,50 a 1,00
de 18 a 29	de 1,00 a 1,75
de 30 a 44	de 1,75 a 2,50
de 45 a 59	de 2,50 a 3,50
de 60 a 74	de 3,50 a 4,00
de 75 a 89	de 4,00 a 5,00
de 90 a 150	de 5,00 a 6,00
acima de 150	de 6,00 a 8,00

Tabela 6.4 – Velocidades recomendadas

Note-se que estas velocidades são apenas recomendadas visando um melhor atendimento aos passageiros, não sendo portanto obrigatórias. No final, o cálculo de tráfego pode-nos indicar velocidades maiores ou menores do que a inicialmente prevista.

6.6 - Tipo de portas

É a indicação do tipo de porta de pavimento escolhida: AL ou AC.

6.6.1 - Abertura livre (m)

É a indicação da dimensão da largura da porta.

6.7 - Tempos adotados (em segundos)

6.7.1 - Aceleração e retardamento

É o tempo gasto para acelerar e desacelerar o elevador, em cada viagem. É obtido na **tabela 6.5**, em função da velocidade (conforme item 6.1 da NBR-5665).

Tempo de aceleração e retardamento:

Velocidade (m/s)	Tempo por paragem
0,75	2,5
1,00	3,0
1,25	3,0
1,50	3,5
1,75	4,0
2,00	4,5
2,50	5,5
acima de 2,50	6,0

Tabela 6.5 – Tempo de aceleração e retardamento

6.8 - Abertura e fecho de portas

É o tempo gasto para a abertura e fecho das portas do elevador em cada paragem.

É obtido na **tabela 6.6** (conforme item 6.1 da NBR-5665), em função do tipo de porta.

Tempo de abertura e fecho de portas:

Tipo de Porta	Tempo por paragem
Abertura Central (AC)	3,9
Abertura Lateral (AL)	5,5
Eixo Vertical (EV)*	6,0

Tabela 6.6 – Tempo de abertura e fecho de portas

6.9 - Entrada e saída de passageiros

É o tempo gasto para a entrada e saída de passageiros da cabina, em cada paragem.

É obtido na **tabela 6.7** (conforme item 6.1 da NBR-5665), em função da abertura livre da porta.

Tempo de entrada e saída de passageiros:

Abertura da Porta	Tempo por passageiro
menor que 1,10m	2,4
maior ou igual a 1,10m	2,0

Tabela 6.7 – Tempo de entrada e saída de passageiros

6.10 - Tempos totais calculados

6.10.1 - Percurso total (T1)

É o tempo gasto pela cabina para percorrer o percurso, de ida e volta, sem parar em nenhum pavimento. Sendo S o percurso (em metros) e V a velocidade do elevador (em metros por segundo), teremos pela expressão (6.2).

$$T1 = \frac{2S}{V} \tag{6.2}$$

6.10.2 - Aceleração e retardamento (T2)

É o tempo gasto nas operações de aceleração e desaceleração durante todo o percurso. É a metade do resultado obtido pela multiplicação do "número de paradas prováveis" pelo tempo de aceleração e retardamento de cada paragem.

6.10.3 - Abertura e fecho de portas (T3)

É o tempo gasto nas operações de abertura e fecho das portas em todo o percurso. É obtido pela multiplicação do "número de paragens prováveis" pelo tempo de abertura e fecho das portas de cada paragem.

6.11 - Entrada e saída de passageiros (T4)

É o tempo gasto para a entrada e saída de passageiros da cabina durante todo o percurso. É obtido pela multiplicação do valor correspondente à capacidade da cabina (excluído o ascensorista) pelo tempo de entrada e saída de cada passageiro.

6.12 - Soma parcial

É a soma dos seguintes tempos:

- Percurso total
- Aceleração e retardamento
- Abertura e fechamento de portas
- Entrada e saída de passageiros

6.13 - Adicional 0,1 (T3 + T4)

É igual a 10% da soma dos tempos de abertura e fecho de portas e de entrada e saída de passageiros.

Essa percentagem de 10% é empírica e representa um adicional devido ao tempo que o elevador espera no andar pelos passageiros distanciados, retardatários, distraídos, etc.

6.14 - Tempo total de viagem (T)

É o tempo total gasto pelo elevador por viagem, incluindo todas as manobras, esperas, etc.

6.15 - Capacidade de transporte (Ct)

É a quantidade de pessoas que serão transportadas em 5 minutos (300 segundos) por um elevador.

Calcula-se por uma simples regra de 3 simpls: se um elevador gasta o tempo T (Tempo total de viagem) para transportar um número de pessoas igual à capacidade da cabina (excluído o ascensorista), então em 300 segundos transportará um número X de pessoas.

Sendo:

C - capacidade da cabina, excluído o ascensorista.
T - Tempo total da viagem, em segundos

Onde:

$$X = \frac{300\ C}{T} = C_t \tag{6.3}$$

6.16 - Capacidade de tráfego (CT)

A capacidade de tráfego (CT), será a soma das capacidades de transporte de cada elevador, ou seja, será a quantidade de pessoas transportadas em 5 minutos pelo grupo de elevadores.

$$C_T = C_{t_1} + C_{t_2} + \cdots + C_{t_n} \tag{6.4}$$

Se os n elevadores possuírem as mesmas características, suas capacidades de transporte serão iguais e a capacidade de tráfego será dada pela expressão (6.5).

$$C_T = nC_t = \frac{300\ Cn}{T} \tag{6.5}$$

O valor da capacidade de tráfego CT deve ser maior ou igual ao valor encontrado por este método, para atender aos preceitos da NBR-5665 quanto ao transporte em 5 minutos.

Se o valor da capacidade de tráfego for inferior ao valor encontrado, o cálculo deverá ser refeito, variando-se a capacidade, ou a velocidade, ou ambas, ou mesmo a quantidade de elevadores, visando atingir o referido número.

6.17 - Intervalo de tráfego (I)

É o tempo total de viagem dividido pelo número de elevadores, dada pela expressão (6.6).

$$I = \frac{T}{n} \tag{6.6}$$

onde:

I = intervalo de tráfego
T = tempo total de viagem, em segundos
n = número de elevadores do grupo

Conceptualmente, "I" é o tempo máximo que um passageiro pode esperar pelo elevador, ou seja, é tempo máximo de espera que ocorre entre a partida de um elevador e a chegada de outro, como mostrado na **figura 6.2** para dois elevadores.

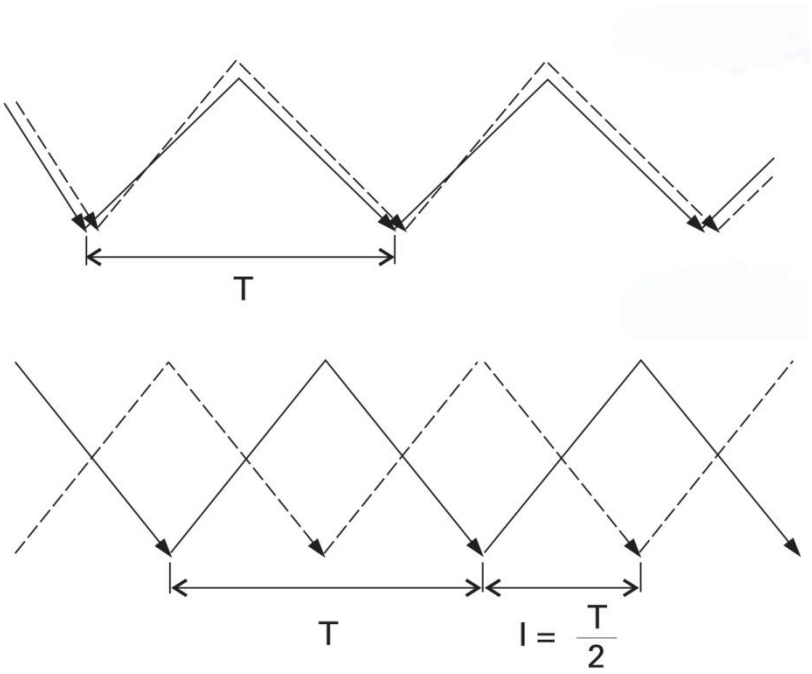


Figura 6.2 – Intervalo de tempo entre a partida **e** chegada de dois elevadores

No instante inicial, os dois elevadores partem juntos, efetuam a viagem e regressam juntos. Então I=T.

No limite, enquanto um elevador sai da primeira paragem para efetuar uma viagem, o outro está a sair da última paragem, efetuando o retorno. Neste caso I=T/2

Para n elevadores, teremos no limite:

$$I = \frac{T}{n} \tag{6.7}$$

O intervalo de tráfego deve ser igual ou inferior ao indicado, ou seja, o anterior intervalo de tráfego máximo admissível (exceto para edifícios de apartamentos).

Se for superior, o cálculo deverá ser refeito, variando-se a capacidade, ou a velocidade, ou ambas, ou mesmo a quantidade de elevadores, visando atingir o referido número.

6.18 - Grau de serviço (K)

Os intervalos máximos admissíveis, indicados na **tabela 6.1** da página 88, foram fixados procurando-se, para cada um dos casos, determinar o grau de satisfação dos usuários, ou GRAU DE SERVIÇO. Este é calculado pela fórmula (6.9).

$$K = \frac{T}{4} + \frac{T}{2} \tag{6.9}$$

onde:

K - grau de serviço;

T - tempo total de viagem, em segundos;

I - intervalo de tráfego.

Desta forma, o GRAU DE SERVIÇO (K) é função do tempo médio (I/2) durante o qual um passageiro aguarda no andar a chegada do elevador, e é função do tempo médio que o mesmo passageiro espera para chegar ao destino, após entrar no elevador (T/4).

- Para K até 45 é considerado excelente;
- Para K de 45 até 55 é considerado bom;
- Para K de 55 até 65 é considerado regular;
- Acima de 65 o valor de K não é considerado.

Com as exigências de transporte em 5 minutos e de intervalos máximos, a instalação dos elevadores, além de atender a uma determinada necessidade de transporte, evita que os passageiros tenham esperas longas ou viagens exageradamente demoradas, resultando em satisfação dos usuários pelo melhor serviço prestado.

6.19 - Exemplo de cálculo

O exemplo de cálculo que a seguir se ilustra, pode ser perfeitamente entendido desde que sigamos o método apresentado.

Vamos considerar como exemplo um edifício de apartamentos. Vejamos então o modelo de cálculo.

MODELO DE CÁLCULO DE TRÁFEGO

LOCAL:
PROPRIETÁRIO:
AUTOR DO PROJETO:
DESTINAÇÃO DE USO: Apartamentos

POPULAÇÃO:		
1 - Composição:	56 aptos. de 2 dorm. sociais e 1 dorm. de serviçal	
2 - Relação:	4 pessoas por 2 dorm. sociais e 1 pessoa por dorm. de serviçal	
3 - População total:	280 pessoas menos 50% do 1º andar =270	
4 - Porcent. mín. a ser transp. em 5 min.:	10%	27
5 - Intervalo de tráfego máx. admissível (s)		
ELEVADOR(ES):		
6 - Unidades do grupo:	2	
7 - Capacidade (pass.):	8	
8 - Paragens:	15	(T- 1º ao 14º)
9 - Paragens prováveis:	7,26	
10 - Percurso (m):	42,00	
11 - Velocidade (m/s):	1,25	
12 - Tipo de portas:	Abertura Lateral	
13 - Abertura livre (m):	0,80	
TEMPOS ADOTADOS (s):		
14 - Aceleração e retardamento:	3,00	
15 - Abertura e fechamento de portas:	5.50	
16 - Entrada e saída de passageiros:	2,40	
TEMPOS TOTAIS CALCULADOS (s):		
17 - T_1 - Percurso total:	67,20	(42,00 x 2 : 1,25}
18 - T_2 – Aceleração e retardamento:	10,89	(7,26 x 3,00 : 2)
19 - T_3 - Abertura e fech. de portas:	39,93	(7,26 x 5,5)
20 - T_4 - Entrada e saída de pass.:	19,20	(8 x 2,40)
21 - Soma parcial ($T_1 + T_2 + T_3 + T_4$):	37,22	
22 - Adicional 0,1 ($T_3 + T_4$):	5,91	
23 - T - Tempo total de viagem:	143,13	
24 - C_t - Capacidade de Transporte (pass):	16,77	(300 x 8 : 143,13)
25 - C_T - Capacidade de Tráfego (pass.):	34	
26 - I - Intervalo de tráfego:	71,57	(143,13 : 2)

OBS.: Prédio de apartamentos com 15 paradas (T+14), distância de piso a piso 3,00m, 4 apartamentos por andar, cada um com 2 dormitórios sociais e 1 dormitório de serviçal. Pretende-se especificar 2 elevadores com lotação da cabina de 8 pessoas e porta de pavimento Abertura Lateral, com 0,80m de largura.

Tabela 6.8 - Cálculo de tráfego em elevadores

Capítulo 7

Elevadores hidráulicos e escadas rolantes

O elevador hidráulico, como pode ser observado na **figura 7.1**, usa um cilindro hidráulico de pistão lateral. A bomba hidráulica é acionada por um motor elétrico. A bomba força o fluído a entrar no cilindro abaixo do pistão, forçando o pistão a subir. Quando o elevador está a descer, a energia potencial é convertida em calor que deve ser dissipada. Nestes sistemas, o cilindro hidráulico está alojado no solo, sendo impermeável para evitar que o fluído hidráulico vaze para o solo contaminando a água deste.

Uma vez que tipicamente os elevadores hidráulicos não têm contrapeso, os elevadores hidráulicos convencionais são os menos eficientes, consumindo por vezes três vezes mais eletricidade do que os elevadores de tração.

Os elevadores hidráulicos viajam a baixas velocidades, tipicamente abaixo do 1 m/s. A distância máxima de viagem para este tipo de elevadores é de cerca de 20 m e encontram-se limitados a não mais do que 7 andares. Isto deve-se ao facto de à medida que a altura da viagem aumenta, aumenta também o diâmetro dos pistões utilizados para conseguir resistir às 12 forças de varejamento.

Este facto aumenta o custo do equipamento o que torna menos atrativa a utilização dos elevadores hidráulicos quando existem alternativas melhores.

Vantagens dos elevadores hidráulicos:

- Não necessita de uma casa das máquinas no topo do edifício.
- As dimensões do poço do elevador são otimizadas.
- A carga é distribuída ao longo das calhas de suporte da cabine, logo não necessita de uma estrutura de suporte no topo do edifício.
- A casa das máquinas pode ser colocada remotamente.
- O custo deste tipo de instalação é menor do que os sistemas de tração convencionais.

Desvantagens dos elevadores hidráulicos:

- Necessita de casa das máquinas para a bomba hidráulica e o sistema de controlo.
- Velocidade e performance limitadas.
- Elevado ruído sonoro comparado com outros sistemas.
- Cheiro intenso devido ao aquecimento do óleo.
- Preocupações ambientais devido ao uso de óleo.
- Qualidade de viagem baixa comparada com outros sistemas.

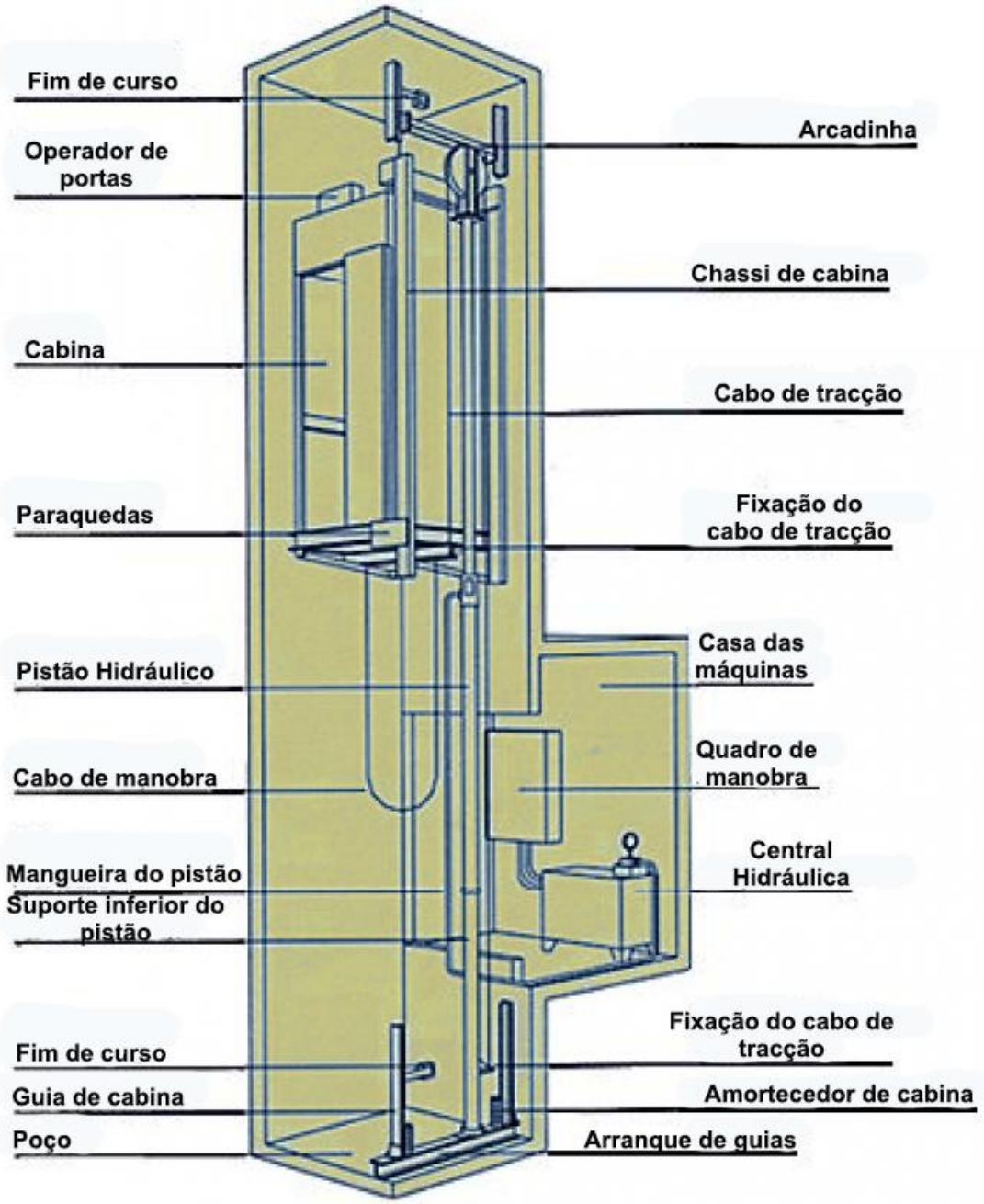


Figura 7.1 – Elevador hidráulico com pistão lateral

Fonte: https://images.search.yahoo.com

7.1 - O surgimento das escadas rolantes

A escada rolante nasceu, em 1892, dos esforços de dois americanos, Jesse W. Reno e George H. Wheeler. Reno patenteou a sua ideia em 15 de março de 1892 e a inaugurou no antigo pier de ferro em Coney Island, Nova York, no outono de 1896.

A escada de Reno era uma esteira inclinada sem fim, feita de placas de madeira, cada uma com 10 centímetros de largura e 60 centímetros de comprimento. Essas madeiras tinham ranhuras revestidas de borracha, direcionadas para a frente, para que os sapatos do usuário aderissem bem. Passavam debaixo de um pente nas duas extremidades da esteira, como acontece numa escada rolante moderna. Um motor elétrico acionava a escada e também o corrimão de borracha, coberto de pelúcia, a uma velocidade de 2,5 quilômetros por hora.

A primeira escada rolante com degraus planos foi patenteada por George H. Wheeler, em 2 de agosto de 1892. Esta não tinha um mecanismo tipo pente e os passageiros entravam e saíam por uma entrada lateral.

Embora a escada de Wheeler nunca tenha sido construída, sua patente foi comprada em 1898 por Charles D. Seeberger, que incorporou a ideia dos degraus planos num desenho aperfeiçoado, de sua autoria. O protótipo de Seeberg foi construído pela Companhia de Elevadores Otis, com quem ele fez um acordo, e entrou em operação na sua fábrica em 1899.

A primeira escada rolante Seeberger para uso público foi instalada na grande Exposição de Paris de 1900.

Foi levada de volta para os Estados Unidos no ano seguinte e instalada na loja de departamentos Gimbel"s, na Filadélfia, onde continuou em operação até 1939. A primeira escada rolante com degraus e um mecanismo tipo pente para o desembarque dos passageiros foi o modelo "L" da Otis, construído em 1921, que incorporava as características mais importantes tanto do modelo Reno como o de Seeberger.

7.2 - Escadas e tapetes rolantes

As escadas e os tapetes rolantes são normalmente utilizados para assegurar o movimento entre pisos adjacentes. A localização destes sistemas deve localizar-se no caminho de circulação das pessoas, de forma a facilitar a sua entrada em segurança.

Os tapetes rolantes são usados para situações especiais, onde seja necessário, por exemplo, transportar carrinhos de compras ou carrinhos de bebé, situações em que as escadas rolantes não podem satisfazer as necessidades.

As escadas rolantes operam a uma velocidade nominal de 0,5 m/s, podendo em alguns casos ir até aos 0,65 m/s.

As inclinações permitidas são de 30º, podendo chegar aos 35º se o desnível for inferior a 6 metros e a velocidade menor que 0,5 m/s.

Os tapetes rolantes trabalham a velocidades que podem variar entre 0,5 m/s e 0,75 m/s. As inclinações possíveis variam entre os 0º e os dos 12º.

Figura 7.2 – Escadas rolantes

Fonte: https://images.search.yahoo.com

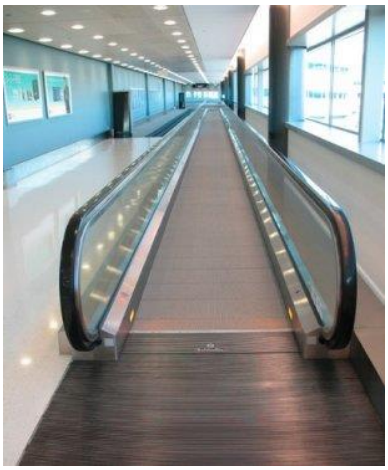


Figura 7.3 – Tapete rolante

Fonte: https://images.search.yahoo.com

7.2.1 - Princípio de funcionamento

Consideramos como componente principal no sistema de uma escada rolante o par de correntes que envolvem os dois pares de engrenagens. O movimento mecânico da escada é fornecido através de um motor elétrico (o modelo trifásico de 70 CV é comumente utilizado). Esse motor movimenta as engrenagens de tração na parte superior que consequentemente

movimentam as correntes. O conjunto do motor e das correntes ficam acondicionados dentro da armação, uma estrutura de metal entre dois assoalhos.

As correntes deslocam uma série de degraus, sempre nivelando os mesmos ao plano horizontal. Na parte superior e inferior da escada rolante, os degraus encaixam-se, criando uma plataforma plana, para facilitar a utilização da escada. Esta configuração pode ser vista na **figura 7.5**.

O degrau, **figura 7.4**, de uma escada rolante possui dois conjuntos de rodas que se movem em dois trilhos em separado. O conjunto de rodas mais próximas da parte superior do degrau é conectado às correntes do sistema e é puxado através da engrenagem de tração localizado na parte de cima do sistema rolante. O segundo conjunto de rodas apenas desliza ao longo do trilho, seguindo o primeiro conjunto de rodas.

Figura 7.4 – Degrau de uma escada rolante
Fonte: https://images.search.yahoo.com

O posicionamento dos trilhos, **figura 7.5**, de forma a proporcionar a mesma nivelação a cada degrau. Na parte superior e inferior da escada rolante os trilhos são nivelados em uma posição horizontal, deixando a escada plana. Para que ocorra o alinhamento correto do degrau com o seu anterior e posterior, cada degrau possui uma série de ranhuras.

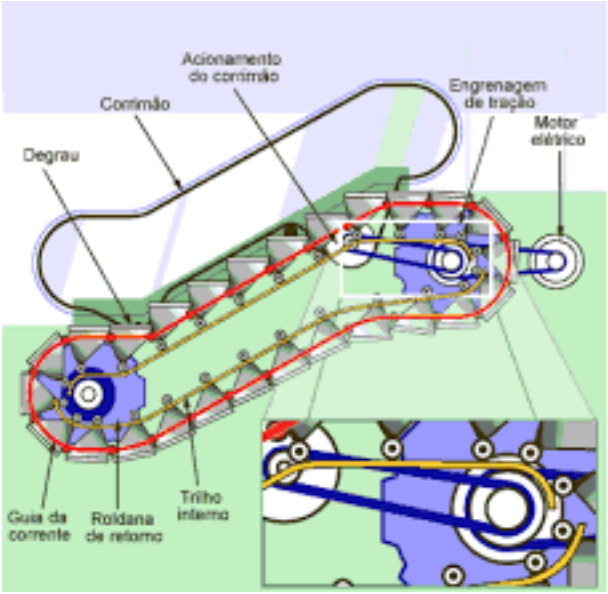


Figura 7.5 - Vista lateral de uma escada rolante

Fonte: https://images.search.yahoo.com

O motor elétrico tem a função de movimentar as correntes principais do sistema e também cada corrimão que compõe o equipamento. O corrimão é uma correia transportadora de borracha que fica em volta de um conjunto de rodas. Essa correia é configurada com precisão de modo que se movimente exatamente na mesma velocidade dos degraus, para facilitar a locomoção de proporcionando estabilidade aos utilizadores.

Algumas características de operação:

- A velocidade da escada rolante varia de 27 a 55 metros por minuto;
- A 44 metros por minuto, a escada pode transportar mais de 10 mil pessoas por hora.

7.3 - Dimensionamento do motor

A potência necessária no motor de tracção de um sistema de escadas ou tapetes rolantes depende de diversos fatores, tais como:

- o desnível da escada rolante ou comprimento do tapete rolante;
- a eficiência do sistema de transmissão da escada ou do tapete rolante;
- a eficiência da caixa de transmissão;
- a velocidade de operação;
- o ângulo de inclinação da escada ou do tapete;

- o número de passageiros em cada degrau (estimativa);
- o desnível de cada degrau.

Para uma instalação de escadas rolantes, a potência necessária de saída (P) em kW necessária para o motor é dada pela fórmula (7.1).

$$P = \frac{\left[v \times m \times g \times n \times \left(\frac{R_e}{R_s}\right) \times \sin\theta\right] + P_h}{\eta_s \times \eta_g \times 1000} \tag{7.1}$$

Onde:

P - potência nominal do motor (kW)
v - velocidade nominal (m/s)
m - peso médio passageiros (kg)
g - aceleração gravidade (9,81 m/s²)
n - úmero de passageiros médio
R_e - desnível da instalação (m)
R_s - desnível degraus (m)
Θ - inclinação (graus)
P_h- potência corrimão (W)
η_s- eficiência sistema de transmissão (%)
η_g- eficiência da caixa de engrenagens (%)

7.3.1 - Tipos de comando existentes

As instalações de escadas e tapetes rolantes são maioritariamente alimentadas por motores de indução. Contudo, com o aparecimento dos novos motores de imanes permanentes, referenciados no capítulo 2, existem novas possibilidades de alimentação.

Para alcançar redução do consumo de energia numa instalação de escadas ou tapetes rolantes é necessário ajustar o funcionamento da mesma ao padrão de tráfego da instalação e/ou optimizar a eficiência do motor fazendo com que trabalhe na janela óptima de funcionamento.

A eficiência energética também pode ser atingida através da melhoria do rendimento global do motor, onde as novas tecnologias de ímanes permanentes e rotor de cobre têm um papel fundamental.

De seguida são apresentados os tipos de comando que existem para escadas e tapetes rolantes:

7.3.1.1 - Ligação estrêla-triângulo

Este método consiste em ligar o motor directamente à rede, podendo alterar o tipo de ligação entre estrela ou triângulo consoante o tráfego da escada, de forma a reduzir o consumo.

No entanto, este método não é recomendado por originar elevadas correntes de arranque.

7.3.1.2 - Arrancadores suaves (Soft-Starters)

Estes dispositivos possuem electrónica de potência capaz de optimizar a fase de arranque, reduzindo significativamente as correntes de arranque.

Contudo este tipo de controlo não tem capacidade de controlo da velocidade do motor.

7.3.1.3 - Controladores de factor de potência

Estes controladores, monitorizam constantemente o fator de potência do motor, optimizando a tensão aplicada de modo a reduzir as perdas.

Apesar de não permitirem variação de velocidade, ajustam continuamente o binário de saída consoante as exigências da carga através da monitorização do factor de potência.

7.3.1.4 - Variadores de tensão e frequência em malha aberta (sem realimentação)

Este tipo de comando promove um arranque suave, além de reduzir bastante as correntes envolvidas na fase do arranque da escada.

Para além disso, permite variar a velocidade da instalação mantendo o binário constante.

7.3.1.5 - Variadores de tensão e frequência em malha fechada (com realimentação)

Com este tipo de equipamento é possível obter as vantagens do variador de frequência em malha aberta, além de estar constantemente a monitorizar o fator de potência ajustando a tensão consoante as exigências de binário, conforme é efectuado nos controladores de factor de potência.

Estes três últimos tipos de comando foram alvo de estudo detalhado no capítulo 6, tendo sido efetuado um estudo económico da implementação de cada um a uma instalação em concreto.

O ajuste do funcionamento da instalação pode ser adequado ao padrão de tráfego através de um funcionamento intermitente ou um funcionamento em duas velocidades. Importa ainda referir que nos sistemas que promovem a variação de velocidade, é necessário instalar periféricos de detecção de passageiros, de forma a adequar o funcionamento mediante o tráfego.

Estes periféricos podem ser sensores de infravermelhos ou de ultra-sons.

Capítulo 8

Melhoria da eficência energética e sua sustentabilidade

8.1- Medidas a adotar

As considerações que foram aqui explicitadas, como o uso da iluminação "LED", o efeito regenerativo que aproveita a energia resultante da frenagem, o uso de motores síncronos de imanes-permanentes e aplicando máquinas sem redutor, só por si melhoram a eficiência energética.

Por outro lado é não menos importante, fazer um estudo de tráfego. Esse estudo vai-nos permitir determinar quais as características do elevador que pretendemos instalar, sendo que o tipo de comando é muito importante na ótica da eficiência energética. Para isso, temos de saber:

- Tipo do edifício;
- Número de pisos;
- Velocidade em m/s;
- Lotação da cabina;
- Tipo de portas;
- Tipo de comando.

Após a recolha destes dados, estaremos em condições de calcular o tráfego do elevador. Diz-nos a prática que em Portugal esta regra não é muito comum. Pelo contrário no Brasil este cálculo é sempre realizado, até porque a norma tem de ser cumprida.

O **Decreto-Lei n.º 153/2014** de 20 de Outubro estabelece as condições necessárias para a produção de energia eléctrica através das energias renováveis. Assim, podemos produzir de forma sustentável a energia de que precisamos. O autoconsumo começa a ser uma alternativa para pequenos e grandes consumidores.

Com esta energia que nos é dada pelo sol através de painéis fotovoltaicos, podemos reduzir a nossa dependência da rede eléctrica de serviço público "RESP". Desta forma iremos alimentar a nossa instalação através do "QPCM" que receberá a alimentação da energia gerada pelos "PV".

A alimentação do elevador far-se-á prioritariamente pelos painéis solares fotovoltaicos que fornecerão uma tensão de 230/400 V à frequência de 50 Hz. A partir do instante em que os valores nominais descem, o sistema eléctrico vai permitir que o equipamento passe a ser alimentado pela rede de baixa tensão.

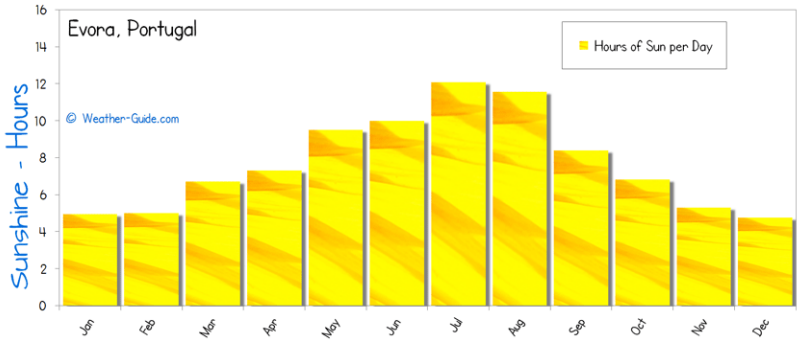


Figura 8.1 – Horas de sol distribuídas ao longo do ano
Fonte: https//images.search.yahoo.com

A **figura** 8.1 mostra-nos as horas de sol distribuídas ao londo do ano sendo a sua maior incidência nos meses de maio até agosto.

Atendo à forte irradiação solar em Portugal, fará todo o sentido que a eficiência energética passe pela instalação de geradores fotovoltaicos.

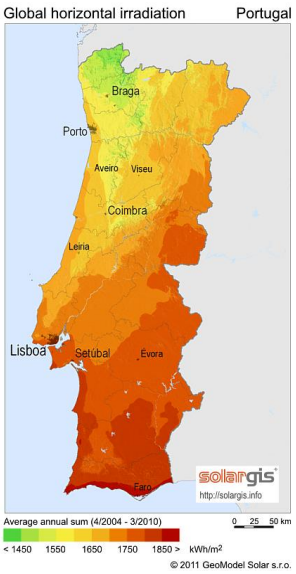


Figura 8.2 – Irradiação solar em Portugal
Fonte: https//images.search.yahoo.com

A **figura 8.2** mostra-nos a distribuição da irradiação solar no território continental de Portugal. Podemos constatar que nas zonas mais a sul a produção de energia fotovoltaica é superior a 1850 KWh/m².

Se a unidade de produção para autoconsumo "UPAC" for instalada num edifício de escritórios e considerando que estes funcionam das 10 horas até às 17:30 horas, vamos nos meses de verão ter a rentabilidade máxima atendendo à posição do sol. O resultado será de termos uma diminuição da factura de energia em cerca de 70%.

Como aos fins de semana os escritórios encontram-se encerrados e portanto não haverá consumo de energia, o gerador fotovoltaico continua a produzir energia eléctrica que pode ser injectada na rede pública de baixa tensão, permitindo deste modo a venda de energia e consequentemente a amortização do investimento.

Por outro lado foi referido que no modo em "standby" o elevador estará a consumir energia eléctrica, pelo facto da iluminação da cabina, dos indicadores de posição e de sentido de marcha estarem ligados, entre outros, consomem energia numa percentagem de cerca de 12% ao ano.

O relé temporizador de fecho (RT) da **figura 8.3** vai permitir que o comando do elevador no modo "*Standby*", deixe de consumir energia elétrica. Ao premir o contacto S1 do botão de chamada do patamar, este vai permitir que seja excitada a bobina do relé ficando depois auto alimentado. Com esta ação o contacto NA (3 e 4) fecha e o circuito de comando é alimentado, contacto que permanecerá fechado enquanto a temporização se mantiver. O tempo de fecho dependerá do tempo de viagem, do número de pisos e das características do edifício. Finda a temporização os contactos NA (1 e 2) e NA (3 e 4) abrem.

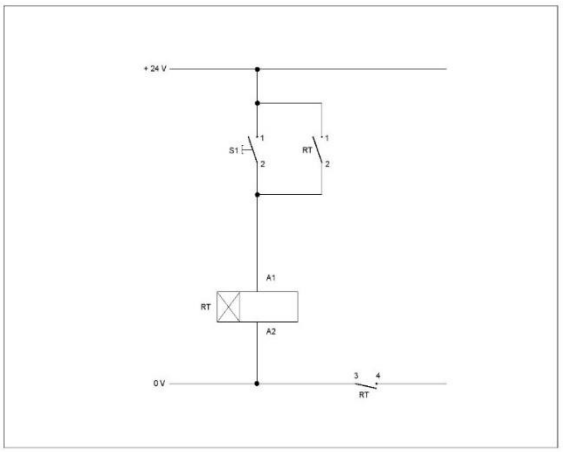


Figura 8.3 – Relé temporizador de fecho inserido no circuito de comando

Legenda do circuito de comando:

- S1 – botão de chamada
- RT (1 e 2) - contacto NA
- RT – relé temporizador
- RT (3 e 4) – contacto NA
- A1 e A2 – alimentação da bobina

A **figura 8.4** é bem representativa de um sistema gerador fotovoltaico com os painéis FV. Sendo a energia produzida pelo sol, através dos painéis solares, uma corrente contínua o inversor converte essa corrente em alternada. O contador dá-nos a indicação da energia produzida pelo sistema. Do contador sai uma alimentação para o "Quadro de Entrada" da habitação. A energia não consumida pode ser injetada na rede pública contabilizada através de um contador bidirecional.

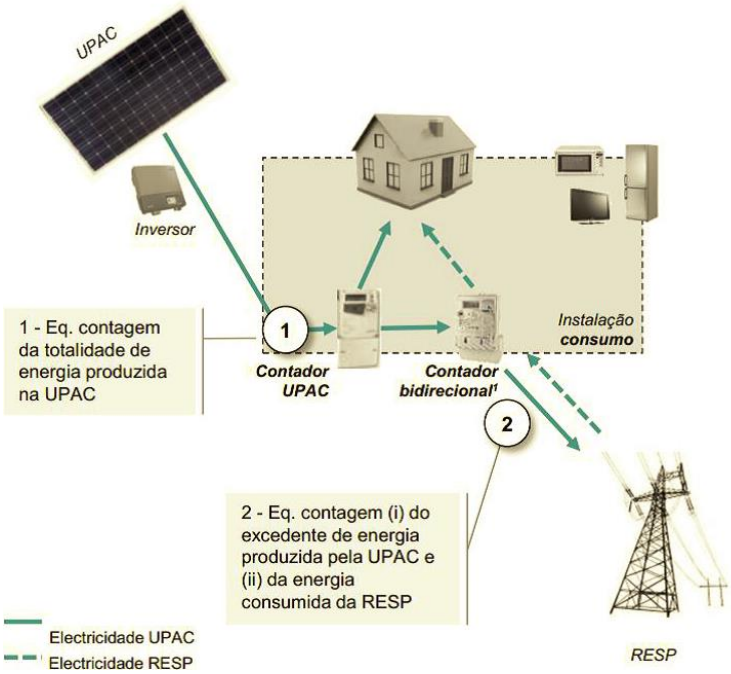


Figura 8.4 – Unidade produtora para autoconsumo (UPAC);

Fonte: www.sinergie.com/upac/

A **figura 8.5** mostra-nos a instalação de painéis solares fotovoltaicos na cobertura de um edifício, cuja orientação da sua superfície deverá ser voltada para sul, dispostos em filas ou "*String's*".

Figura 9.5 – Gerador fotovoltaico - instalação de painéis FV
na cobertura de um edifício; Fonte: https//images.search.yahoo.com

8.1.1 – Conclusão

Tendo em conta os elevados consumos de energia elétrica que os elevadores acarretam, e pelo exposto, concluímos que com a aplicação de um relé temporizador eliminamos os consumos que resultam do modo em "*Standby*" e pela instalação de painéis fotovoltaicos diminuindo drasticamente a nossa dependência da energia elétrica da rede.

Referências

[1] Comparação experimental das características de funcionamento de um motor de ímanes permanentes com condições de alimentação diversas – Tese de mestrado integrado ref.ª 000165684 realizada na "FEUP".

[2] A eficiência energética; variação de velocidade por variação de frequência, revista " O Elec tricista ".

[3] Variadores electrónicos regenerativos; utilização racional de energia; auditoria energética; certificado energético, revista "ELEVARE".

[4] Eficiência energética em elevadores e escadas rolantes na União Europeia – Projecto E4; Estimativas de poupanças energéticas, revista "ELEVARE n.º 1".

[5] Elevadores hidráulicos da "Dissertação da tese de mestrado de Daniel António Pedroso Rodrigues – UC"

[6] Escadas rolantes do "Trabalho de conclusão do curso da Universidade Tecnológia Federal do Paraná - Brasil".

[7] Cálculo de tráfego em elevadores do "Manual de Transporte Vertical em Edifícios" da Atlas Schindler.